

南海地区降水的时空特征*

江 静 钱永甫

(南京大学大气科学系, 南京, 210093)

摘 要

文中利用美国 NCEP 重分析资料中的1979~1995年17 a 逐旬的全球降水资料, 采用小波分析方法分析了南海地区降水的多时间层次和多空间层次结构, 研究了南海季风的爆发及时间演变, 探讨了南海季风爆发的机制。结果表明: (1) 南海季风爆发于5月中旬, 季风爆发过程实际上是小范围(32个经度) 降水向大范围(64个经度) 降水调整的过程, 一旦出现较强的大范围降水, 并到达南海地区, 就爆发了南海季风, 调整完毕则是印度季风和东亚季风的相继爆发。(2) 在10°N 以北的地区, 季风最早发生在南海, 然后逐渐西移到印度, 达到印度季风最盛期后, 迅速东撤。(3) 南海地区可分为3个区域: 北部(20°~22°N)、中部(10°~20°N) 和南部(10°N 以南)。南海雨季主要发生在10°N 以北的北部和中部, 北部雨季是平稳增强的单峰型, 而中部雨季是突发性的, 雨季内降水起伏较大。(4) 南海季风区有很强的年变化, 30~60 d 和20~30 d 的变化也比较显著, 还有3个月左右的周期变化。除年振荡以外, 各种周期振荡随时间变化较大, 在雨季表现得最强烈。(5) 南海季风的爆发与20~30 d 和30~60 d 两种低频振荡有关。

关键词: 南海季风, 降水, 小波分析, 低频振荡。

1 引 言

亚洲夏季风, 包括印度季风和东亚季风, 对中国东部的气候变化, 特别是大尺度降水的变化, 起着非常重要的作用。此外, 亚洲季风还通过遥相关影响全球气候。长期以来, 国内外气象工作者对亚洲季风进行了大量的研究, 取得了丰硕的成果^[1, 2]。近年来, 人们发现南海季风爆发于印度季风和东亚季风之前^[3~5], 南海季风的建立标志着亚洲季风的开始, 可以说是亚洲季风大举北进之前奏。而且, 南海季风本身对东亚、北太平洋的气候有着不可估量的影响, 它与西太平洋、印度洋和亚洲大陆的对流和环流系统以及邻近海域的 SST 异常有着密切的关系。因此, 进一步认识南海季风爆发的机制, 是研究亚洲季风的成因、预报中国东部夏季降水的关键之一。然而, 虽然国内外气象工作者对印度季风和东亚季风进行了大量的研究, 但对南海季风仍然缺乏系统的研究。另外, 由于观测资料的缺乏, 关于南海季风的研究工作主要依靠卫星资料和大尺度数值天气预报模式的分析资料。

* 初稿时间: 1997年10月30日; 修改稿时间: 1998年11月24日。

资助课题: 国家自然科学基金重点项目“中国区域气候变化分析和机理研究”(49735170) 和国家重点基础研究发展规划(G1998040900第一部分) 联合资助。

气候变化具有多时间尺度和多空间尺度的特性, 包含了多层次的突变。但以往的分析方法, 包括 Fourier 分析, 因为不具有局部、多层次和多分辨的性质而不能客观地反映这种多层次结构规律。而小波分析基于平移和伸缩的不变性, 具有正则性、局部性和 k 阶消失矩等良好的性质^[6,7]。小波分析方法将时间序列引入频率、时间和空间来描述, 因此特别适合于对信号进行多尺度分析、局部分分析和奇异性分析^[8,9]。这无疑为研究气候变化的多层次结构和突变特征提供了新方法。

文中利用小波分析方法分析了南海地区降水的多时间层次和多空间层次结构, 探讨了南海季风的爆发及时间演变。所用资料为美国 NCEP 重分析资料中的 1979~1995 年 17 a 逐旬的全球降水资料, 经双线性插值到 $2^\circ \times 2^\circ$, 所选区域为 $30^\circ \text{E} \sim 180^\circ, 0^\circ \sim 40^\circ \text{N}$ 。

2 小波分析方法简介

选择 Morlet 小波, 其母小波为

$$\Psi(x) = e^{icx} e^{-x^2/2} \quad (1)$$

其中 c 为常数(这里取 $c = 5.4$), 函数 $f(x)$ 的小波变换系数为

$$T_{ab}(f) = a^{-1/2} \int f(x) \Psi^* \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \quad (2)$$

其中, $\Psi^*(x)$ 是 $\Psi(x)$ 的复共轭, $a > 0$ 为伸缩因子, $b \in R$ 为平移因子, 一维连续小波变换将一维信号变换到由尺度参数 a 和平移参数 b 所构成的小波平面上, 与物理空间和谱空间相对应。小波变换又称为数学上的显微镜, 它把低维信号放在高维空间去观察, 通过小波 $\Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 在位置 b 为最大的性质, 可以研究 $f(x)$ 在各时刻或各位置上的奇异性。通过伸缩尺度 a 的调节, 可以探讨 $f(x)$ 在不同尺度上的演变情况。

一般而言, 伸缩尺度因子 a 与 Fourier 分析中的周期 T (或频率) 并没有一一对应关系, 但 Morlet 小波函数是一个周期函数经过 Gaussian 函数平滑而得到的, 所以它的伸缩尺度 a 与 Fourier 分析中的周期 T 有如下对应关系:

$$T = \left[\frac{4\pi}{c + \frac{2}{c}} \right] a \quad (3)$$

信号 $f(x)$ 在尺度 a 的全域能量密度为

$$E(a) = \frac{1}{C_\Psi} \left| T_{ab}(f) \right|^2 \frac{db}{a} \quad (4)$$

其中,

$$C_\Psi = 2\pi \left| \int \Psi(\omega) \right|^2 \frac{d\omega}{\omega}$$

而信号 $f(x)$ 在位置 b 的总能量密度以及尺度 $a_1 - a_2$ 的能量密度为

$$E(b) = \frac{1}{C_\Psi} \left| T_{ab}(f) \right|^2 \frac{da}{a^2} \quad (5)$$

$$E(b, a_1, a_2) = \frac{1}{C_\Psi} \int_{a_1}^{a_2} \left| T_{ab}(f) \right|^2 \frac{da}{a^2}$$

这样, 根据前述伸缩尺度 a 与 Fourier 分析中的周期 T 的对应关系, 不仅可以观察 $f(x)$ 的小波能量密度随频率的变化(即小波谱), 还可以观察能量密度随时间或位置的变化, 以及

各频段能量密度随时间或位置的变化。

3 南海季风的空间尺度特征

为了了解南海季风的空间尺度特征,我们作了纬圈小波变换,取尺度因子

$$a = 2 \times 2^k / P, \quad \text{其中 } k = 0.2 \times (j - 1), \quad P = \frac{4\pi}{c + \frac{2}{2 + c^2}}$$

图1给出了30 E~180范围内0~40 N 平均的纬圈小波变换随时间的演变,其中纵坐标为与小波变换的尺度 a 相对应的 k (相应的空间尺度见表1),横坐标为经度。1~3月,30 E~180主要是小范围的降水(图略)。4月上旬(图1a),在90~120 E 出现32个经度范围的降水区,在100~110 E 还有16个经度大小的降水区,但强度不大。在4月中旬,100~130 E 内开始出现64个经度的降水区,之后,降水区逐渐扩大,覆盖80~140 E 范围。到5月上旬(图1b),100 E 附近的大范围降水强度增大,降水中心位于100~110 E。5月中旬(图1c),强度继续增大,较强的降水区范围扩大到80~130 E,覆盖整个南海区域,此即南海季风的爆发。6月份(图1d),大范围降水范围基本上维持在70~140 E,但强度不断加强,中心也逐渐西移,6月下旬位于90 E 附近,另在60~120 E 范围内出现一些小的降水波

表1 小波变换的尺度 a (或 k)
对应的空间尺度和时间尺度

k	1	2	3	4	5
空间尺度(经度)	64	32	16	8	4
时间尺度(d)	360	180	90	45	22.5

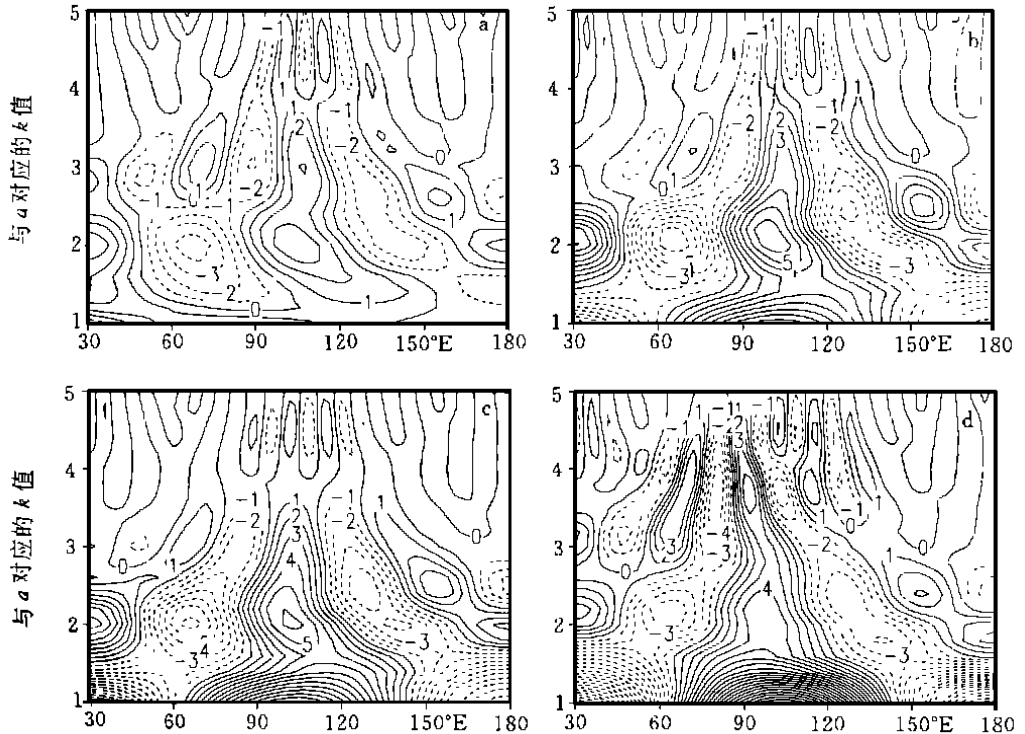


图1 0~40 N 平均的纬圈小波变换

(a. 4月上旬; b. 5月上旬; c. 5月中旬; d. 6月中旬。实线为正值,虚线为负值,等值线间隔为2)

动。此后降水继续向西发展, 达到亚洲季风最盛期, 并维持到9月上旬。之后, 大范围降水减弱, 逐渐消失。从小波变换图可看出, 南海季风爆发实际上是小范围(32个经度)降水向大范围(64个经度)降水调整的过程, 一旦出现较强的大范围降水, 并到达南海地区, 就爆发了南海季风, 调整完毕则是印度季风和东亚季风的相继爆发。

图2给出各个经度的纬圈小波变换系数的时间变化, 纵坐标是小波变换系数, 横坐标是时间。80~130 $^{\circ}$ E 范围内夏季有非常强的大范围降水(图2a), 从80 $^{\circ}$ E 向东降水强度逐渐增强, 到100 $^{\circ}$ E 附近达到最大, 再向东逐渐减小。降水的变化是突发性的, 在4月下旬到5月上旬有一次突变, 在5月下旬到6月上旬有第二次突变, 降水最大值出现在7~8月, 随经度而异, 70~80 $^{\circ}$ E 最大降水发生在7月中旬, 90~100 $^{\circ}$ E 出现在7月下旬, 而100 $^{\circ}$ E 以东的南海110~130 $^{\circ}$ E 则出现在8月中旬。至于70 $^{\circ}$ E 以西的阿拉伯海和130 $^{\circ}$ E 以东的西太平洋则在夏季不出现大范围降水。较小尺度的降水主要发生在80~110 $^{\circ}$ E(图2b), 以90~100 $^{\circ}$ E 强度最大, 100 $^{\circ}$ E 以东的南海区域最大值发生在春季, 110 $^{\circ}$ E 在5月下旬, 100 $^{\circ}$ E 以西的东亚季风区最大值出现在夏季, 80 $^{\circ}$ E 在7月下旬至8月上旬。90~100 $^{\circ}$ E 则出现双峰型, 一个峰值出现在4月下旬, 另一个峰出现在9月。

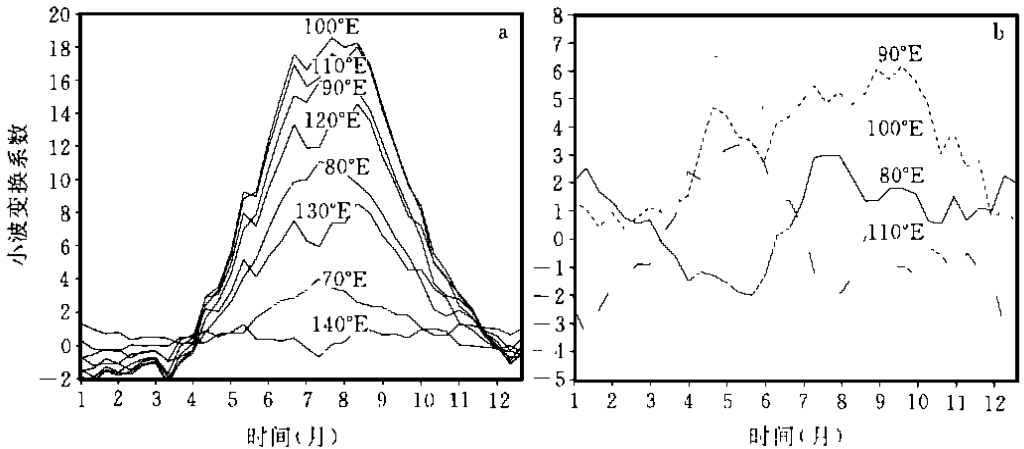


图2 各个经度的纬圈小波变换系数的时间变化

(a. 64个经度尺度; b. 32个经度尺度)

为了讨论南海季风的时空变化, 我们对各纬圈5月上、中、下旬的降水作了小波变换, 得到各个尺度小波变换的空间分布, 图3给出了5月中旬的结果。在32个经度和64个经度这两个尺度的图上, 降水区发生在0~30 $^{\circ}$ N, 70~140 $^{\circ}$ E 的范围内, 而较强的降水区位于80~130 $^{\circ}$ E, 5月上旬较强的降水区出现在20 $^{\circ}$ N 以北(图略), 5月中、下旬大降水区扩展到20 $^{\circ}$ N 以南, 但基本上位于10~30 $^{\circ}$ N。在64个经度的图上, 有两个正中心, 一个位于中国长江以南地区, 另一个位于东南亚和南海地区, 北太平洋中部、阿拉伯半岛和西南太平洋是负中心。在32个经度的图上有两个较强的正中心, 一个位于长江以南到华南沿海地区, 另一个则位于东南亚及孟加拉湾地区, 而阿拉伯海和西北太平洋为负中心。

从图3可以看出, 南海地区降水是有区域性的, 我们用相关分析对南海地区进行了分区, 图4给出了分区的结果。以16 $^{\circ}$ N, 112 $^{\circ}$ E 为参考点, 计算区域内各点与参考点的相关系

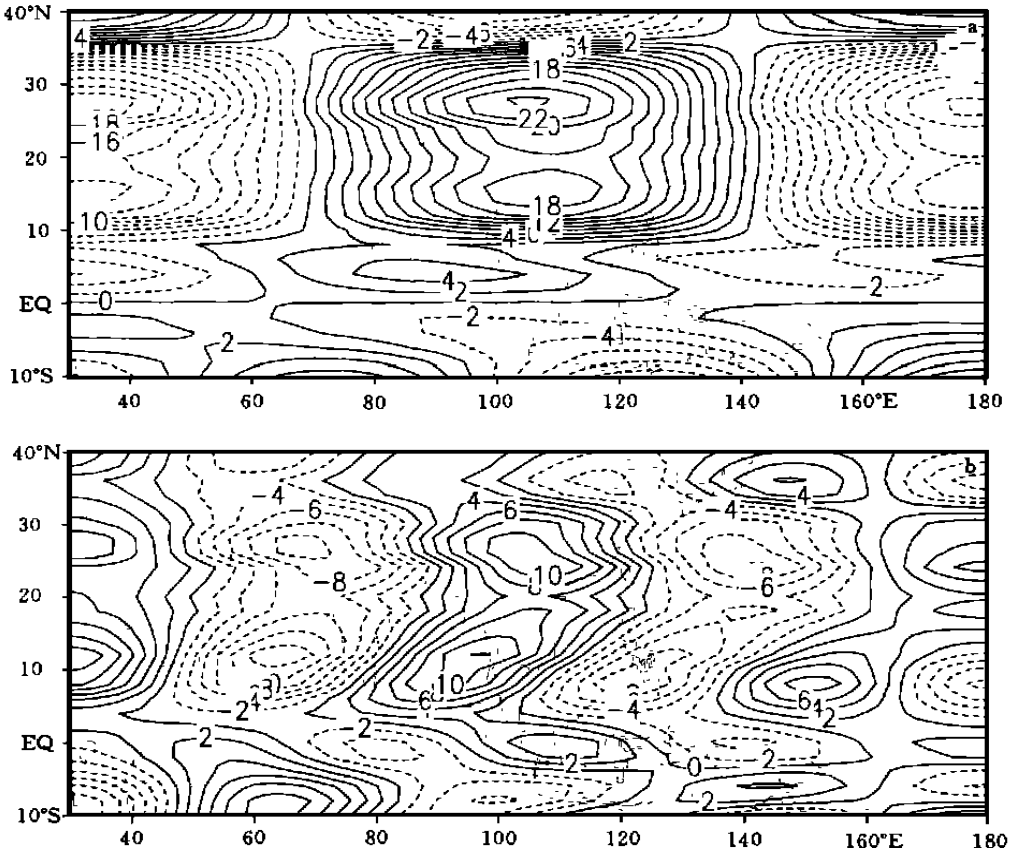


图3 各个尺度小波变换的空间分布

(a. 64个经度尺度; b. 32个经度尺度. 实线为正值, 虚线为负值, 等值线间隔为4)

数, 图4中的实线给出相关系数大于等于0.9的区域。再以22°N, 112°E为参考点, 得到图4中虚线所示区域(等值线为0.9), 以8°N, 112°E为参考点, 得到图4中点线所示区域(等值线为0.8)。这样, 将南海分成3个区域: 北部(20~22°N)、中部(10~20°N)和南部(10°N以南)。

下面我们来看一下各纬度大范围(64个经度)降水区的最大轴线随时间的演变(图5)。在22°N(图5a)小波变换系数的最大轴线从1月份的126°E向西移动, 但强度较弱。5月上旬到达108°E, 强度突然增强, 之后的5月中、下旬, 一直维持在108°E, 但强度继续增强。6月上旬起突然快速西移, 6月中旬到达102°E, 且强度增加很快, 6月下旬达到最强。之后直到8月下旬, 强度

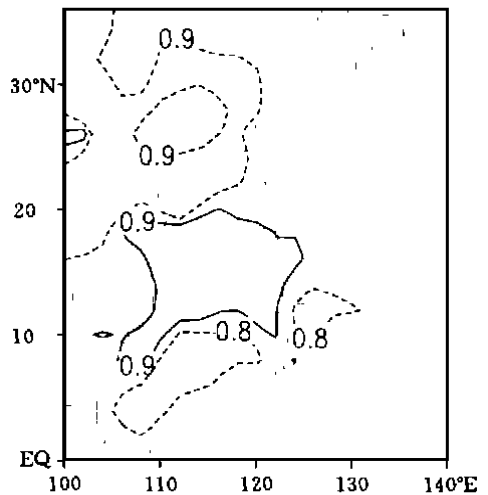


图4 南海地区降水相关系数分布

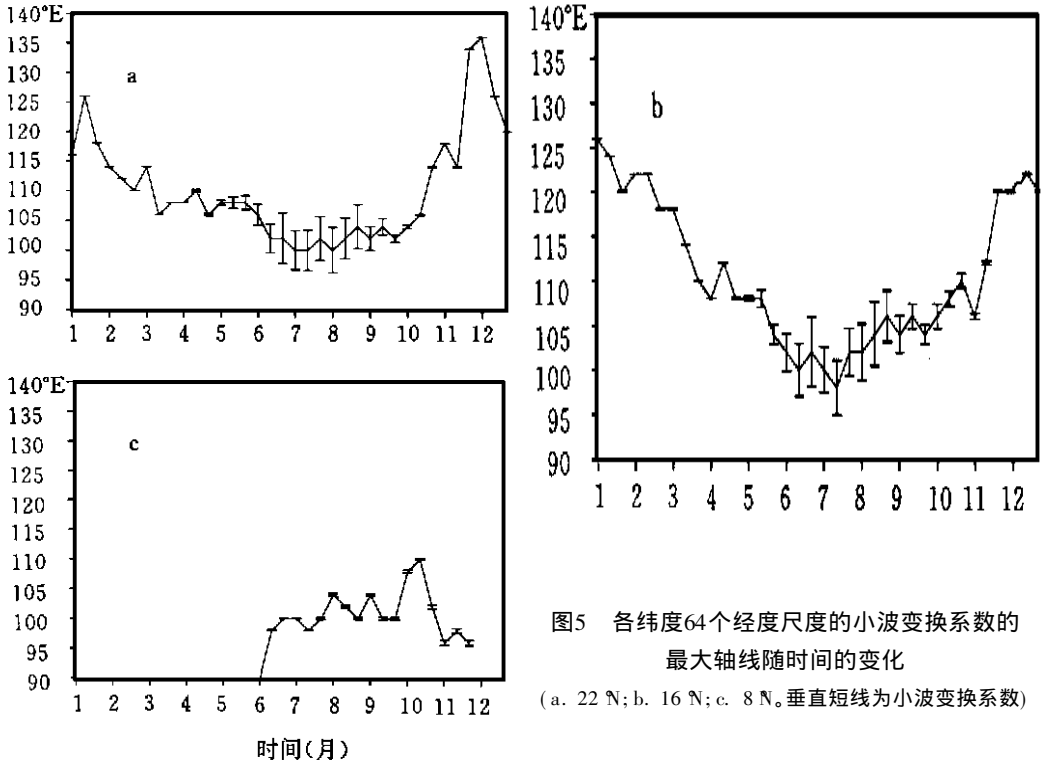


图5 各纬度64个经度尺度的小波变换系数的最大轴线随时间的变化
(a. 22 N; b. 16 N; c. 8 N. 垂直短线为小波变换系数)

时间(月)

基本上维持不变,中心位置在100~104 E之间摆动。9月份强度逐渐减弱,10月以后迅速东撤。16 N(图5b)的基本变化形势与图5a一致,但有些细节上的差异。4月下旬最大轴线的中心已位于108 E,5月中旬强度突然增强,并迅速西移,到6月中旬,中心已移至100 E,7月中旬中心位于最西位置(98 E),然后开始东撤,但强度仍维持不变,9月上旬以后迅速减弱。图5c(8 N)的特征与前两图截然不同,中心强度很弱,且中心位置向东移动。

4 南海季风的时间尺度特征

用 Morlet 小波作时间小波变换,取 $a = 9/4 \times 2^k/P$, 其中 k, P 与前节相同。

图6左边是南海北部、中部和南部3个区域多年平均的降水,横坐标是时间,纵坐标是降水率(mm/d)。图6右边是与左图对应的降水时间序列的小波变换系数,图中横坐标是时间,纵坐标是与小波变换尺度 a 对应的 k , 相应的时间尺度见表1。

南海中部和北部的降水具有非常强的年变化,是典型的夏雨型。北部雨季始于4月中、下旬(图6a),属于平稳增强的单峰型,峰值出现在8月中旬。从小波变换的图来看(图6d),南海北部以年变化为主,除了年变化以外,还存在3个月到半年的振荡,由于各波的共同作用,降水率的峰值对应于年尺度的波上低频波峰值叠加处。中部是南海的主体,雨季突然开始于5月中旬(图6b),降水迅速增加,到6月下旬达到第1个峰值,7月上旬出现季风中断,8月中旬季风再度增强,达到第2个峰值,其后(8月下旬到9月下旬),降水较少,直到10月上旬出现降水的第3个峰值。随即,降水急剧减少,雨季结束,雨季内降水起伏较大。在小波变换图上(图6e),表现出有很强的年振荡,还有明显的20~30 d及30~60 d的振荡,降水率

的几个峰值与30~60 d的振荡有较好的对应关系。南海南部降水属于冬雨型(图6c),雨季起于7月中旬,缓慢增加,降水率的峰值发生在11月中、下旬,降水强度不大。图6f也显示出南部的年变化与北部和中部相比要弱得多,另外,3个月到半年的变化也比较明显。

我们分析了南海季风能量随频率的分布(图7),发现南海北部有很强的年变化,30~60 d及20~30 d的变化也比较显著,还有3个月左右的变化;南海中部的年变化也比较强,此外,还有显著的20~30 d和30~60 d的振荡,3~4个月的周期变化也接近显著性水平;南海南部的年变化不明显,但有较强的半年变化以及20~50 d和60~90 d的振荡。

图8给出了南海地区3个区域上述各种显著周期振荡的年变化。南海中部和北部的年周期振荡几乎不随时间变化(图中未画出),而其它的周期振荡则有较大的变化。在南海地区普遍存在有90 d左右的周期振荡,这种振荡在雨季表现得最明显(图8中的实线)。在南海

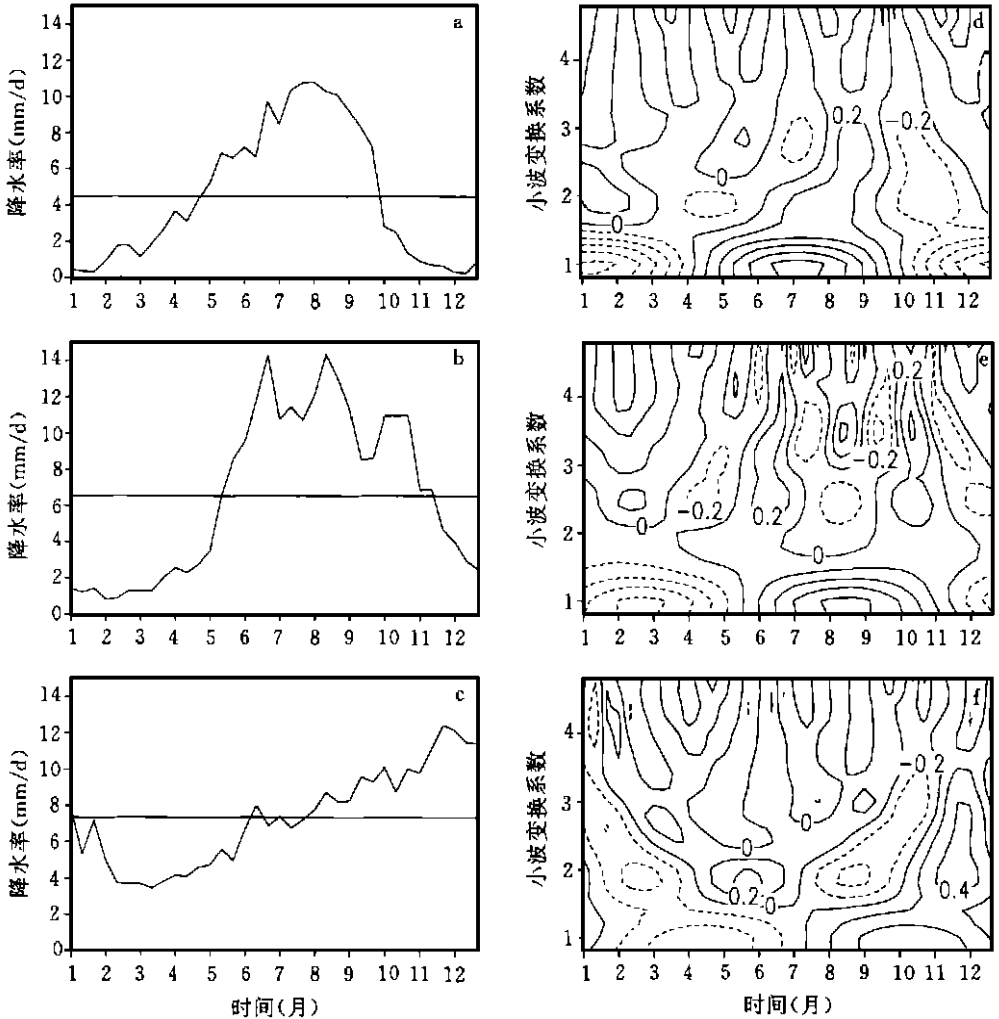


图6 南海地区多年平均的降水率及其对应的小波变换系数

(a. 南海北部; b. 南海中部; c. 南海南部; d, e, f. 分别为3个地区多年平均降水率的小波系数。

实线为正值, 虚线为负值, 等值线间隔为0.2)

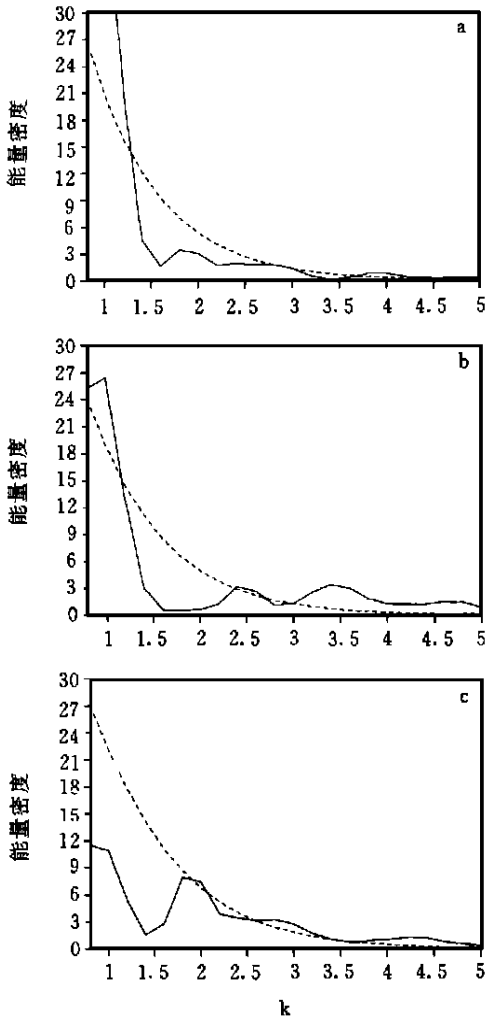


图7 南海季风的小波谱

(a. 南海北部; b. 南海中部; c. 南海南部。
实线是谱值, 虚线是 $\alpha = 0.1$ 的临界谱)

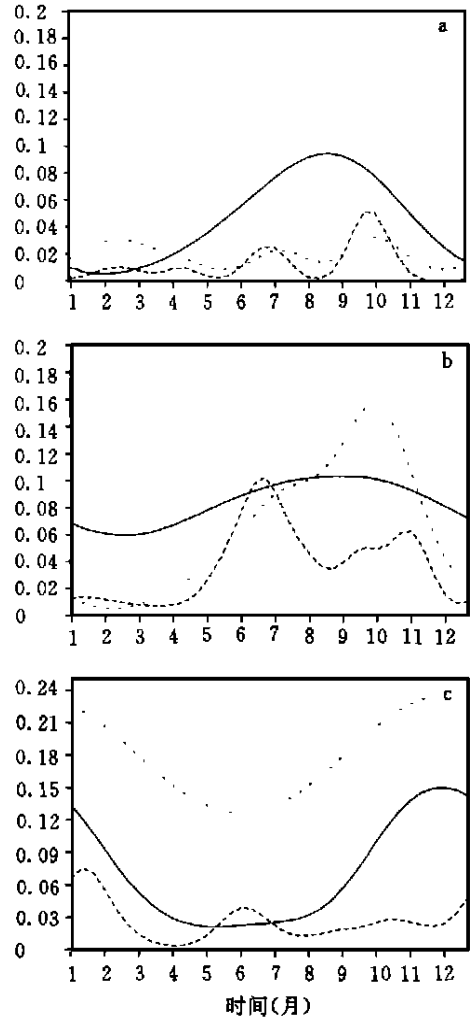


图8 南海季风各显著周期的年变化

(a. 南海北部; b. 南海中部; c. 南海南部。
实线: 90 d 的振荡; 虚线: 20 ~ 30 d 的振荡;
点线: a, b. 30 ~ 60 d 的振荡, c. 半年振荡)

海北部30 ~ 60 d 的振荡与20 ~ 30 d 的振荡在雨季的变化基本上一致, 都是在6月底和9月底较强。而南海中部20 ~ 30 d 的振荡及30 ~ 60 d 的振荡在整个雨季都比较强, 20 ~ 30 d 的振荡突然开始于4月下旬, 然后迅速增强, 在6月中旬达到最强, 30 ~ 60 d 的振荡则早在3月底就开始增强, 5月中旬至6月中旬增强较快, 在10月上旬达到最强。南海南部雨季内主要是半年左右及90 d 左右的振荡。

5 南海季风爆发的机制探讨

为了探讨南海季风爆发的机制, 我们考察了多年平均的降水率与各尺度小波变换系数之间的关系(图9), 发现年变化尺度的小波变换系数与雨季的变化非常吻合, 但小波变

换系数的变化略落后于降水率的变化。20 d 和60 d 的振荡在雨季以外变化很小,而在雨季内则起伏较大,20 d 的振荡于4月底增强后,在5月中旬处于正的位相,而这时正是雨季的开始,之后,当20 d 和60 d 的振荡都处于峰值时,降水出现峰值,而当两者都处在低谷时,降水明显较少。也就是说,南海雨季有明显的20 d 和60 d 的振荡。另外由图8b可知,20 ~ 30 d 及30 ~ 60 d 的振荡都开始于南海季风爆发之前,而在两者迅速增强时,南海季风爆发。这说明南海季风爆发与20 ~ 30 d 和30 ~ 60 d 的振荡之间有某种联系。

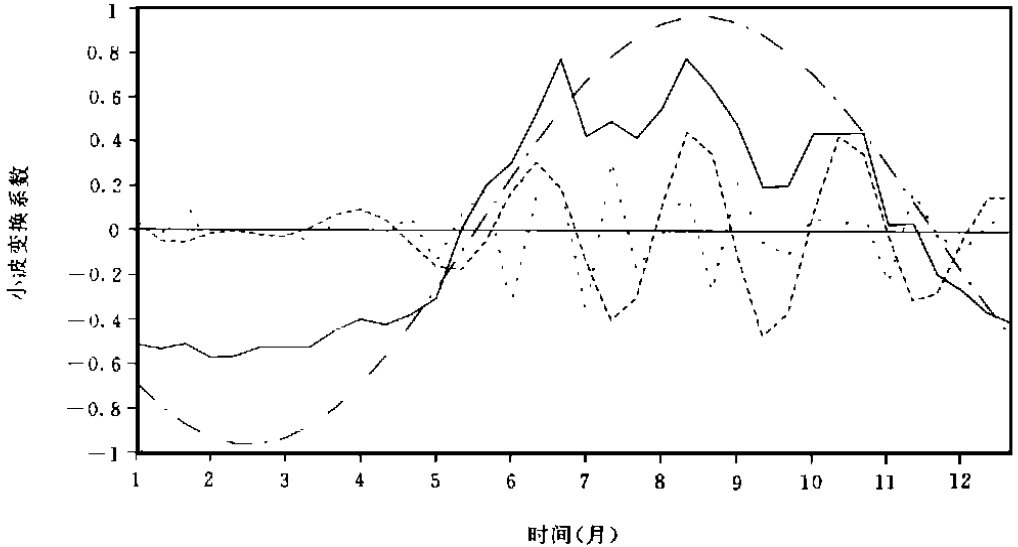


图9 多年平均的降水率距平(实线)及各尺度小波变换系数的年变化
(点划线: 360 d 周期, 虚线: 60 d 周期, 点线: 20 d 周期)

6 结 论

根据前面的讨论,我们得出以下结论:

(1) 南海季风爆发于5月中旬,季风爆发过程实际上是小范围(32个经度)降水向大范围(64个经度)降水调整的过程,一旦出现较强的大范围降水,并到达南海地区,就爆发了南海季风,调整完毕则是印度季风和东亚季风的相继爆发。

(2) 在10°N 以北的地区,季风最早发生在南海,然后逐渐西移到印度,达到印度季风最盛期后,迅速东撤。

(3) 南海地区可分为3个区域:北部(20°~22°N)、中部(10°~20°N)和南部(10°N 以南)。南海雨带在季风爆发后主要发生在10°N 以北的北部和中部,北部雨季是平稳增强的单峰型,而中部雨季是突发性的,雨季内降水起伏较大。

(4) 南海季风区有很强的年变化,30 ~ 60 d 和20 ~ 30 d 的变化也比较显著,还有3个月左右的周期变化。除年振荡以外,各种周期振荡随时间变化较大,在雨季表现得最强烈。

(5) 南海季风的爆发与20 ~ 30 d 和30 ~ 60 d 两种低频振荡有关,在两者迅速增强时,南海季风爆发,而当两者同时处于峰值时,对应降水较强,而当都位于低谷时,降水较弱。

参考文献

- 1 陈隆勋,朱乾根,罗会邦等.东亚季风.北京:气象出版社,1991.362pp
- 2 Ma Henian, Ding Yihui. The present status and future of research of the East Asian Monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14(2): 125-140
- 3 Cheng Tsing-Chang, Chen Jau-Ming. An observational study of the south China Sea monsoon during the 1979 summer: Onset and life. *Mon Wea Rev*, 1995, 123(8): 2295-2318
- 4 Lau K-M, Yang S. Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14(2): 141-162
- 5 阎俊岳.南海西南季风爆发的气候特征. *气象学报*, 1997, 55(2): 174~185
- 6 崔景泰.小波分析导论.西安:西安交通大学出版社,1995.367pp
- 7 秦前涛,杨宗凯.实用小波分析.西安:西安电子科技大学出版社,1995.173pp
- 8 Meyers S D等.海洋学和气象学中的子波分析介绍:对 Yanai 波频散的应用. *大气情报*, 1997, 17(2): 1~10
- 9 胡增臻,石伟.子波变换在大气科学中的应用研究. *大气科学*, 1997, 21(1): 8~72

THE GENERAL CHARACTER OF PRECIPITATION OVER THE SOUTH CHINA SEA

Jiang Jing Qian Yongfu

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*)

Abstract

By using wavelet transform method to the 10-day precipitation rate of the NCEP reanalyzes data for the 17-year period from 1979 to 1995, the multi-hierarchy structures in time and space of precipitation over the South China Sea (SCS) are studied. The onset and development of the SCS monsoon are analyzed, and the onset mechanism of the SCS monsoon is discussed. The conclusions are as follows: (1) The onset of the SCS monsoon occurs around mid-May. The onset process is that the small range (32 longitudes) precipitation adjusts to the large range (64 longitudes) precipitation. Once the large precipitation takes place and arrives at the SCS, it is the onset of the SCS monsoon. After the adjustment, onsets of the Indian monsoon and the East Asian monsoon begin in succession. (2) To the north of 10°N, the monsoon onset first occurs in the SCS, then propagates westward gradually to India. (3) The SCS region can be divided into three subregions: the northern (20°~22°N), the middle (10°~20°N) and the southern (to the south of 10°N). (4) In the area of the SCS monsoon, the annual cycle is very evident, and the oscillations of 30~60d and 20~30d are also evident. Besides these, there is a period of around 3-month. (5) The onset of the SCS monsoon is the result of the interaction between the low-frequency oscillations of 20~30d and 30~60d.

Key words: South China Sea monsoon, Precipitation, Wavelet transform, Low-frequency oscillations.