

亚非季风区夏季降水变率*

叶瑾琳 王绍武 李晓东 赵宗慈

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

(国家气候中心, 北京 100081)

摘 要 本文利用比较完整的格点资料, 采用 Gamma 分布百分位数的降水量指标系统分析了亚非季风区夏季降水变率及其与赤道东太平洋冷水区 SST 的关系。首先根据 REOF 分析, 指出亚非季风区里有五个关键地区, 分别为萨赫勒地区、日本南部到中国长江流域、中国华南到印度半岛东部、热带非洲地区和东北亚地区。然后利用子波分析等方法对这五个中心地区的降水变化进行了较深入的研究。

关键词 降水变率 Gamma 分布百分位数 REOF 分析 子波分析

1 引言

日本、中国、印度及萨赫勒同处亚非大陆的季风盛行区, 绝大部分降水集中于夏季风盛行时期 (6、7、8 月)。这几个地区的降水虽然受不同的气候因子影响, 但也存在着密切的联系, 在这个区域上空对流层高层 150 hPa 附近, 夏季有一支稳定的东风急流, 其东西范围大约从西太平洋经日本和中国的南部海洋、印度半岛, 一直到西非, 与季风区的东西范围大致相当, 高空急流与降水区的分布有密切关系^[1~3]。研究这种典型季风区的夏季降水变化对了解降水变化的机制以及降水可能对气候产生的影响都具有重要意义^[4]。

本文利用比较完整的网格点资料, 采用 Gamma 分布百分位数的降水量指标系统分析了亚非季风区夏季降水变率及其与赤道东太平洋冷水区 ($0^{\circ} \sim 10^{\circ}\text{S}$ 、 $180^{\circ} \sim 90^{\circ}\text{W}$) SST 的关系。资料主要包括中国近 40 年 (1951~1991) $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格点资料 (966 个格点) 和亚非季风区近百年 (1900~1991) 2.5 纬度 $\times$ 3.75 经度网格点资料。在对资料的处理上, 考虑到降水空间分布的巨大差异及降水量是一种偏态分布的特点, 经过我们对多种降水量指标的对比研究, 发现采用 Gamma 分布百分位数的概率指标来描述降水量的分布较为合理。它能同时兼顾降水多与降水少的地区, 是研究大范围区域降水特点的较好指标^[5]。在分析方法上, 采用了 REOF^[6,7]和子波分析^[8,9]等方法。REOF 的最大特点就是每个特征向量集中反映一个地区, 其时间系数就表征了该区域的降水变化特点。子波分析能同时显示降水变化的振幅、位相和周期。

2 REOF 分析

根据 REOF 分析方法, 按 North 判别准则, 取前 8 个特征向量, 做方差极大正交

1995-12-29 收到

• 本文得到国家攀登计划“气候动力学和气候预测理论研究”项目第七课题的资助

转动。第一特征向量主要对应萨赫勒地区,而在其他地区,特征向量值接近于零(图 1a);第二特征向量主要突出中国江淮流域和日本南部的降水(图 1b);第三特征向量主要反映中国华南降水与印度半岛东部降水的关系(图 1c);第四特征向量主要反映热带非洲的降水特点(图 1d);第五特征向量是以东北亚为中心(图 1e)。这样,每个特征向量对应的时间系数就分别表征了 5 个中心区的降水变化特点。

2.1 萨赫勒地区

从 REOF1(图 1a)来看,整个萨赫勒地区在空间上基本呈一致变化,而从时间系数来看(图 2a),由于特征向量均为正值,所以从 1900 年到 1939 年,萨赫勒地区属于较湿润的时期,本世纪 40 年代则是一段降水稍少的 10 年,从 50 年代初到 60 年代中期,降水明显偏多,从 60 年代后期开始,整个萨赫勒地区降水明显减少,这与 Hulme 的结果是一致的^[10]。比较典型的干旱年有 1972、1973、1984、1987、1990 年等,而 1972~1973 年正是萨赫勒的第一次干旱危机,1984 年和 1990 年,降水距平比 1930s 到 1950s 低 50%左右,1961 年到 1990 年的 30 年比 1931~1960 年的 30 年降水约减少 20%~40%。

2.2 日本南部—中国江淮

转动后的第二个特征向量是以日本南部为中心(图 1b),并与中国的江淮流域连成一块。从空间分布来看,该地区与中国河套及印度西北部地区变化相反。人们一直都在研究印度季风降水与中国季风降水变化的关系,从这里我们看到,印度西北部夏季风降水与中国长江流域降水变化相反,而与黄河流域降水变化一致。从时间系数来看(图 2b),日本南部及中国江淮流域从 1900 年到 1928 年,降水偏多比偏少略占优势,在 1929 年到 1944 年左右,则是一段干旱较频繁的时期,之后从 1945 年到 1957 年是一段降水明显偏多的时期,这中间就包括了 1954 年的长江大涝。到本世纪 70 年代末,降水出现一种年际振荡变化,而 80 年代开始,降水又偏多,1991 年的江淮大水也有反映。

2.3 中国华南—印度半岛

转动的第三个特征向量(图 1c)是以中国华南为中心,并进一步反映出中国夏季降水与印度夏季风降水的关系。从空间分布来看,长江以南包括日本南部与长江以北降水变化相反,印度半岛东部地区与长江以南降水变化相反,与长江以北变化一致。从印度到长江以南,再到长江以北,呈“+—+”的波列形式。这与第二个特征向量的空间结构相当一致,但突出的中心地区不一样。从时间系数来看(图 2c),基本上是一种 20 年左右的振荡,从 1900 年到 1910s 初,长江以南降水较少,到 60 年代初,降水偏多与偏少基本上以 10 年左右的周期轮回出现。60 年代后期到 70 年代中期,江南降水偏多。而从 70 年代中期直到 90 年代,以华南为中心,降水明显偏少。

2.4 热带非洲地区

REOF 的第四个特征向量是以热带非洲为中心(图 1d),它与萨赫勒的降水在空间结构上变化相反,这与 REOF1 的空间结构一致,但突出的中心正好相反。这也正是 REOF 的优点之一^[7]。从时间系数来看(图 2d),从本世纪初到本世纪中叶左右,热带非洲地区降水主要呈 5 年左右的振荡,从 40 年代中期到 50 年代末,则以年际振荡为主。60 年代降水偏多,而此时,萨赫勒正好降水偏少,70 年代到 80 年代有几次降水较少的年,但基本维持平衡,到 80 年代中后期,降水略偏多。

2.5 东北亚地区

转动后的第五特征向量主要以东北亚为中心(图 1e), 从空间结构看, 东北亚的降水变化与日本南部降水变化相反。从时间系数来看(图 2e), 东北亚的降水主要是一种 20 年左右的振荡。从 20 世纪到 20 年代初, 年际振荡较强, 20 年代中期到 30 年代后期, 东北亚地区降水偏多, 40 年代到 50 年代初期, 降水减少, 而从 50 年代中期到 60 年代初期, 又是一段降水偏多的时期, 之后又呈现几年左右的振荡变化。

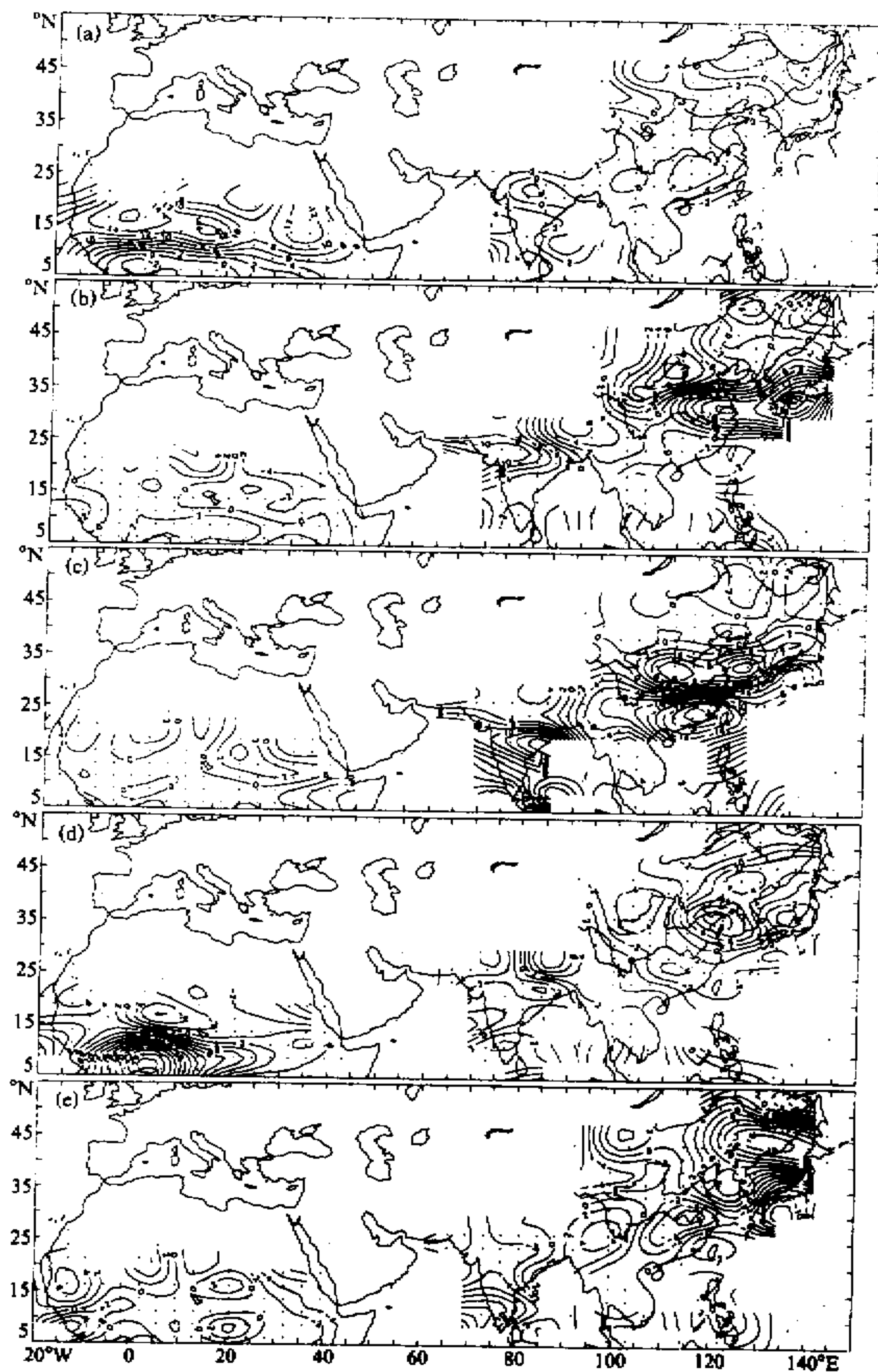


图 1 REOF 分析的特征向量

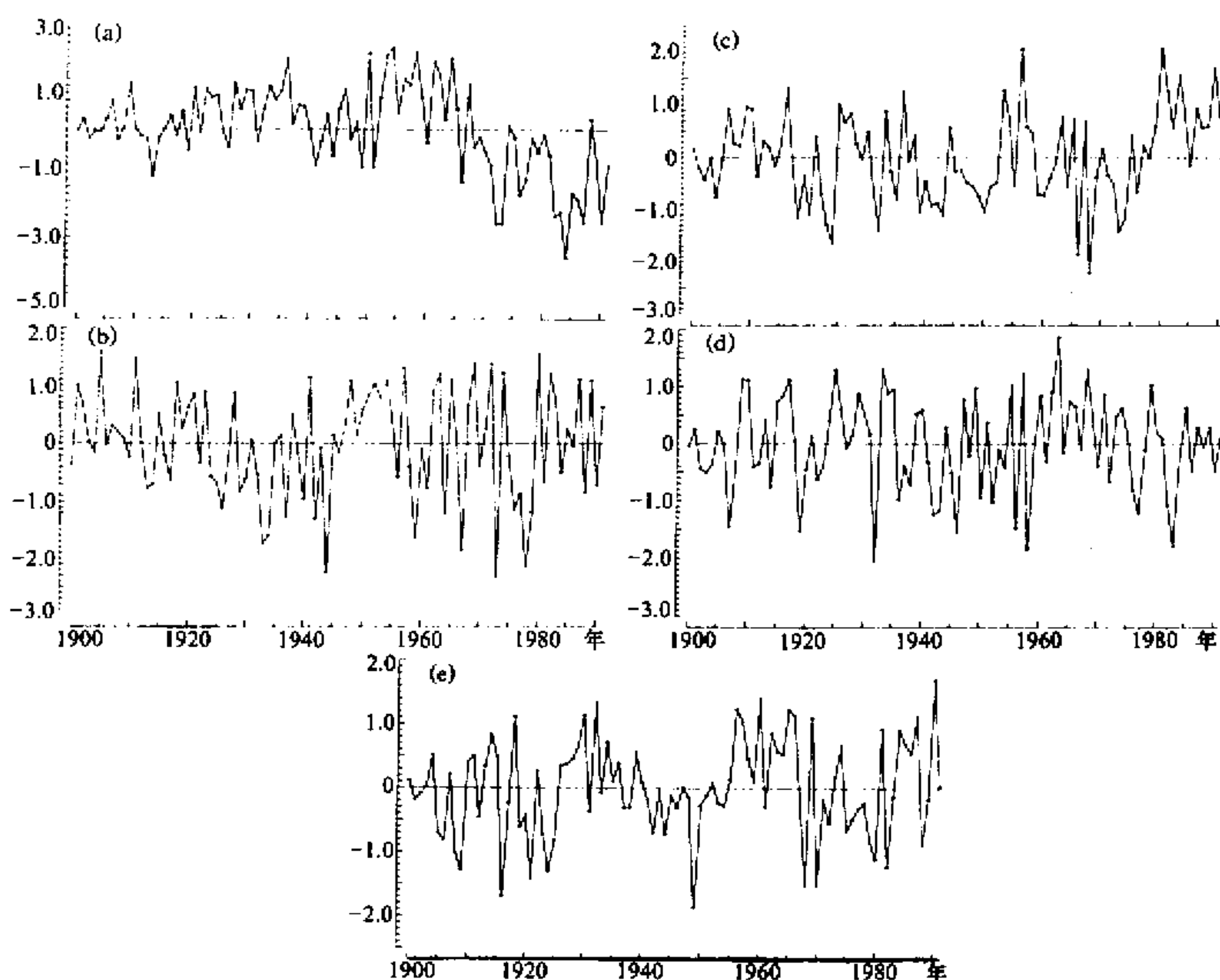


图2 REOF 分析的时间系数

3 5个中心区的降水变化规律

3.1 功率谱分析

为了对亚非季风区5个中心的降水变化规律有一个深入的认识,我们首先对对应于5个中心的时间系数做功率谱分析,最大落后取35年。如图3所示,横坐标为频率,纵坐标为功率谱值,曲线为红噪声95%信度界限,凡达到或超过红噪声标准的,在峰值处标出周期长度。

从功率谱分析我们可以看出,萨赫勒地区70年以上的长期趋势比较明显,同时,还有3.5年左右的振荡周期(图3a),而日本南部地区到中国长江流域,主要是3年的振荡周期(图3b)。以华南为中心的地区,以20~30年的周期变化为主,同时10年的周期变化也接近信度标准(图3c)。热带非洲地区虽然没有达到信度的振荡周期,但从图3d上可以看出,5年及2.7年的周期变化也比较突出。以东北亚为中心的地区,降水变化以20年左右的振荡周期为主(图3e)。这些与上一节的结论是一致的。

总之,功率谱分析表明,亚非季风区存在明显的年际或年代际的振荡周期,但对不同的地区,其变化周期则不一样,有的地区同时存在几种周期变化,而有的地区则以某一种周期振荡为主或者没有显著周期。

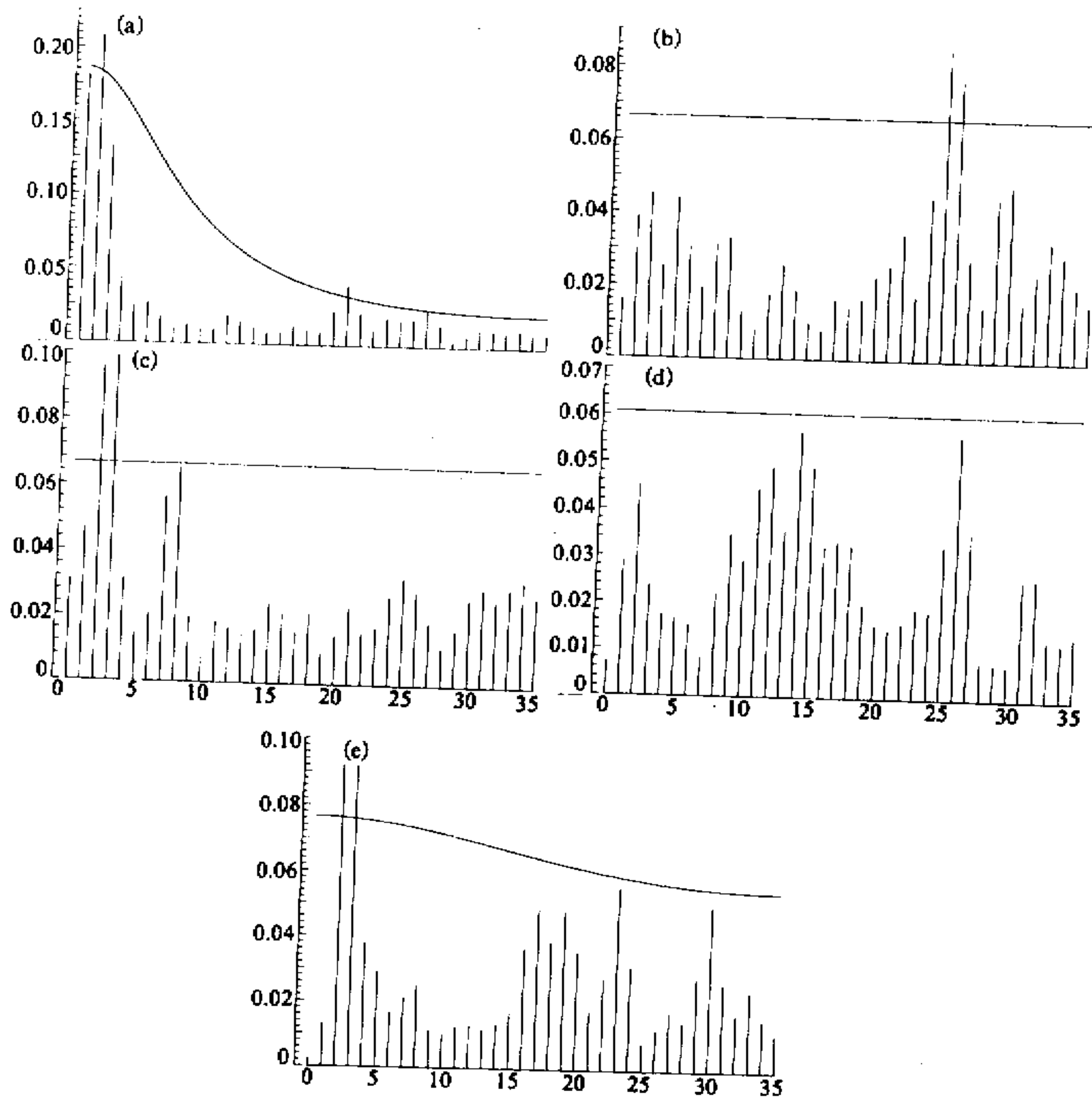


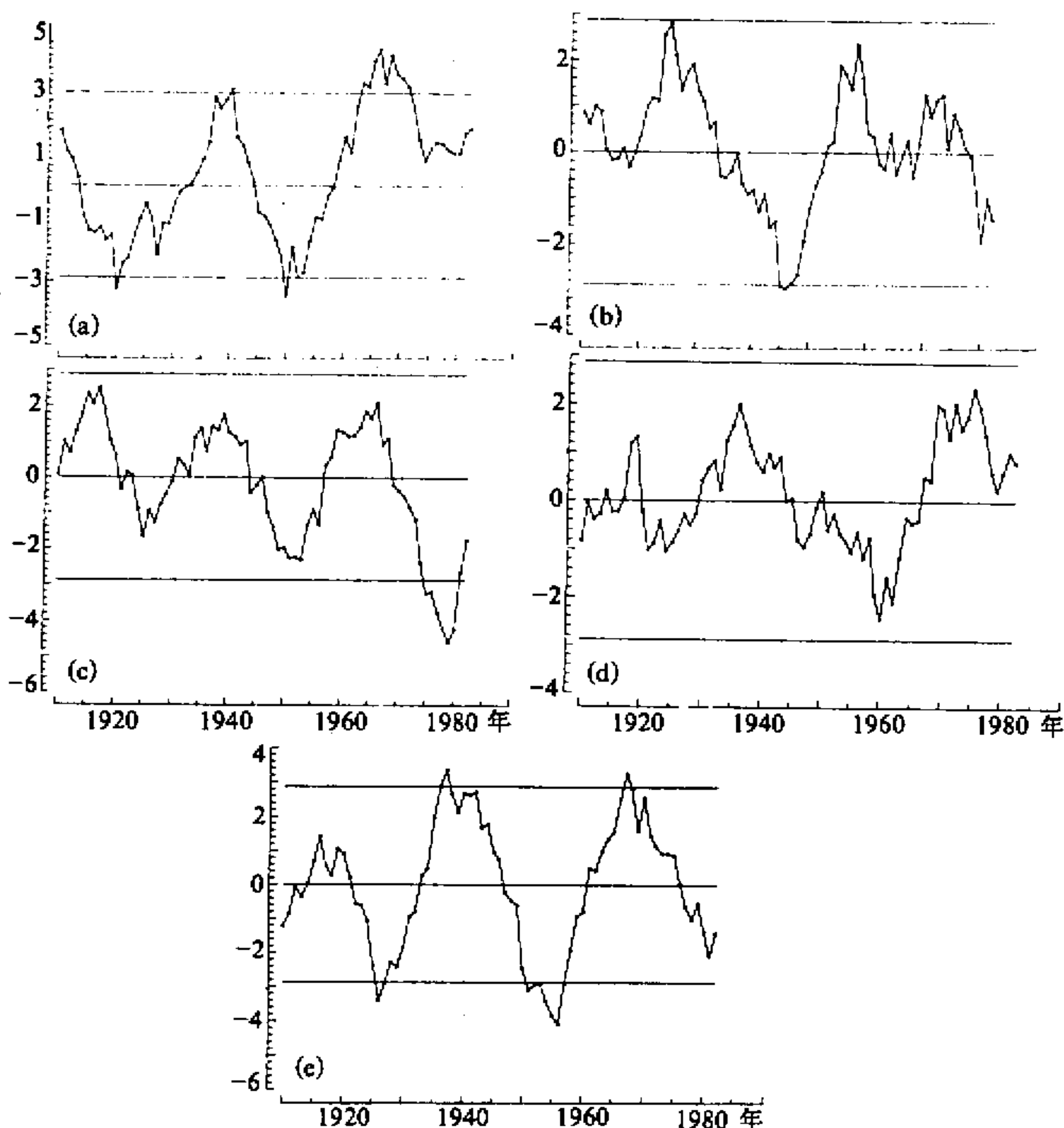
图3 5个中心的功率谱

3.2 降水变化的 t 检验

为了分析降水变化是否有突变性, 对 5 种空间结构的时间系数做 t 检验^[11,12]。 t 值用两个相邻 10 年间的平均时间系数, 前 10 年的平均值减去后 10 年的平均值来算, 作为后 10 年中第 1 年的 t 值。如果 t 值为正, 同时特征向量场也为正, 则表示该区域在该时间段降水比前 10 年减少, 如果特征向量场为负, 则表示后段时间比前段时间降水增多, 如果 t 值为负, 则正好与此相反。取显著水平为 99%, 即 $|t| > 2.88$, 如图 4 所示, 横坐标为时间年, 纵坐标为 t 值, 水平横线分别为 99% 的信度标准和零线。

t 检验表明, 萨赫勒地区 (图 4a) 的降水在本世纪共有 4 次较大的突变, 其中 2 次为降水显著增加, 分别出现在 1920 年左右和 1950 年前后, 另外 2 次突变为降水显著减少, 分别出现在 1940 年前后和 20 世纪 60 年代后期, 特别是 60 年代后期的降水减少极为明显, 这从时间系数上 (图 2a) 也可直接看到这一点。

对日本南部—长江流域地区 (图 4b), 在 20 世纪 40 年代中后期有一次降水明显增

图4 5个中心的 t 检验

加的突变, 而从前面我们知道, 1950 年前后正是该地区降水显著偏多的时期。另外, 该地区 20 年代后期的降水减少也较明显, 虽然没有达到 99% 的信度标准, 但如果以 95% 的信度标准 ($|t| > 2.10$) 来衡量, 也是一次降水明显减少的突变。同样, 在 50 年代后期也有类似的降水减少的突变现象存在。

以中国华南为中心的地区 (图 4c), 在 70 年代末, 检测到一次降水明显减少的突变现象, 同时说明此时在印度半岛东部降水显著增加。在 50 年代初也有一次类似的突变现象, 超过 95% 的信度标准。而在 1910s 年代后期则出现了一次与此相反的突变, 达到 95% 的信度标准, 该次突变表明印度半岛东部在 1910s 后期降水明显减少, 而中国华南地区则降水显著增加。

对热带非洲地区的 t 检验表明 (图 4d), 在 1960 年前后, 该地区有一次较强的降水增加, 而在 70 年代中上期则是降水显著减少。2 次不同的降水突变均达到 95% 的信

度标准。

东北亚地区的降水突变(图 4e)与萨赫勒地区的降水突变非常相似,只是 2 次降水明显增加的突变比萨赫勒地区稍晚一段时间,分别是 20 年代中后期和 50 年代。而 2 次降水明显减少的突变几乎是与萨赫勒同时出现,也分别在 1940 年前后和 60 年代后期到 70 年代初。4 次不同的突变,其程度与萨赫勒地区一样都很强。

东北亚地区与萨赫勒地区在地理位置上相差甚远,属于不同的气候系统,一个在 45°N 附近,另一个则在 15°N 附近,经度上相距也很大,虽然这 2 个地区都受季风降水的影响,但它们相似的降水突变是否有必然的联系,或者说只是一种偶然巧合,这都值得我们去进一步研究。

从上面我们看到,在亚非季风区里,降水存在着突变现象。一般说来,对不同的中心地区,在不同的时段有不同程度的降水突变,但也有降水突变非常相似的地区。造成降水突变的原因是什么?各地区间的降水突变也否存在着某种联系?这都是我们以后将要研究的问题。

3.3 降水变化的子波分析

从上面的功率谱分析中,我们知道亚非季风区不同地区存在一种或几种不同的振荡周期。为了更好地看出在某一时段主要是哪几种周期起主要作用,利用子波分析方法,对各中心地区的时间系数进行了进一步研究。子波分析结果如图 5 所示,水平轴为时间年,垂直轴为与频率对应的序数。

萨赫勒地区(图 5a): 70 年代和 80 年代的干旱是由各频段共同作用的结果。而 50 年代后期到 60 年代初的降水偏多则是几十年的周期振荡占主导地位。同时,从 30 年代开始,该地区年代际的振荡周期逐渐向低频移动,即周期变长,这表明该区域长期趋势越来越明显。图 6a 是图 5a 的一条横切线,它相当于滤波的结果,对应周期约为 35 年左右。从该图上我们更加清楚地看到萨赫勒地区降水的几十年振荡,它的 2 个峰值与 2 个低谷与我们前面的分析完全一致,特别是 60 年代后期开始的降水减少更加直观地表现出来。

日本南部—长江流域(图 5b): 该地区的降水主要是高频变化,也就是功率谱里检测到的 3 年左右周期,这突出体现在 3 个干旱时期上,即 40 年代初,1960 年前后和 70 年代后期。从横切线图 6b 上可以看出,该地区降水偏多与偏少的三十几年振荡在 30 年代的干旱期和 50 年代的多雨期比较突出,同时也反映了该地区的一种年代际降水趋势。

中国华南—印度半岛东部(图 5c): 中国华南在 20 年代上半期由中高频造成的多雨转入后半期由高频变化造成的少雨,然后经过一段相对缓和的时期,从 50 年代由中高频造成的干旱又转到 1960 年前后主要由高频造成的多雨。而在 70 年代前半期,降水偏多在高频和中频上都有体现。从横切线图 6c 上可以看出,从三十多年的周期振荡来看,中国华南地区从 60 年代的多雨转入 80 年代的干旱时期,而在此之前,三十几年的振荡并不明显。印度半岛东部的降水变化正好与此相反。

热带非洲地区(图 5d): 以高频变化为主,30 年代的多雨与 70 年代后期到 80 年代初的多雨尤为突出。60 年代的降水偏多则主要是中频变化所致。从三十多年的振荡周期来看(图 6d),40 年代的降水偏少与 60 年代的降水偏多比较明显。

东北亚地区 (图 5e): 以中低频变化为主, 而且波列排列整齐, 造成降水偏多与偏少的主要中低频以十几年的周期轮回出现。从横切线图 6e 上, 我们再次看到, 它的几十年振荡变化与萨赫勒地区的降水变化非常相似, 只是振幅变化不太一样。

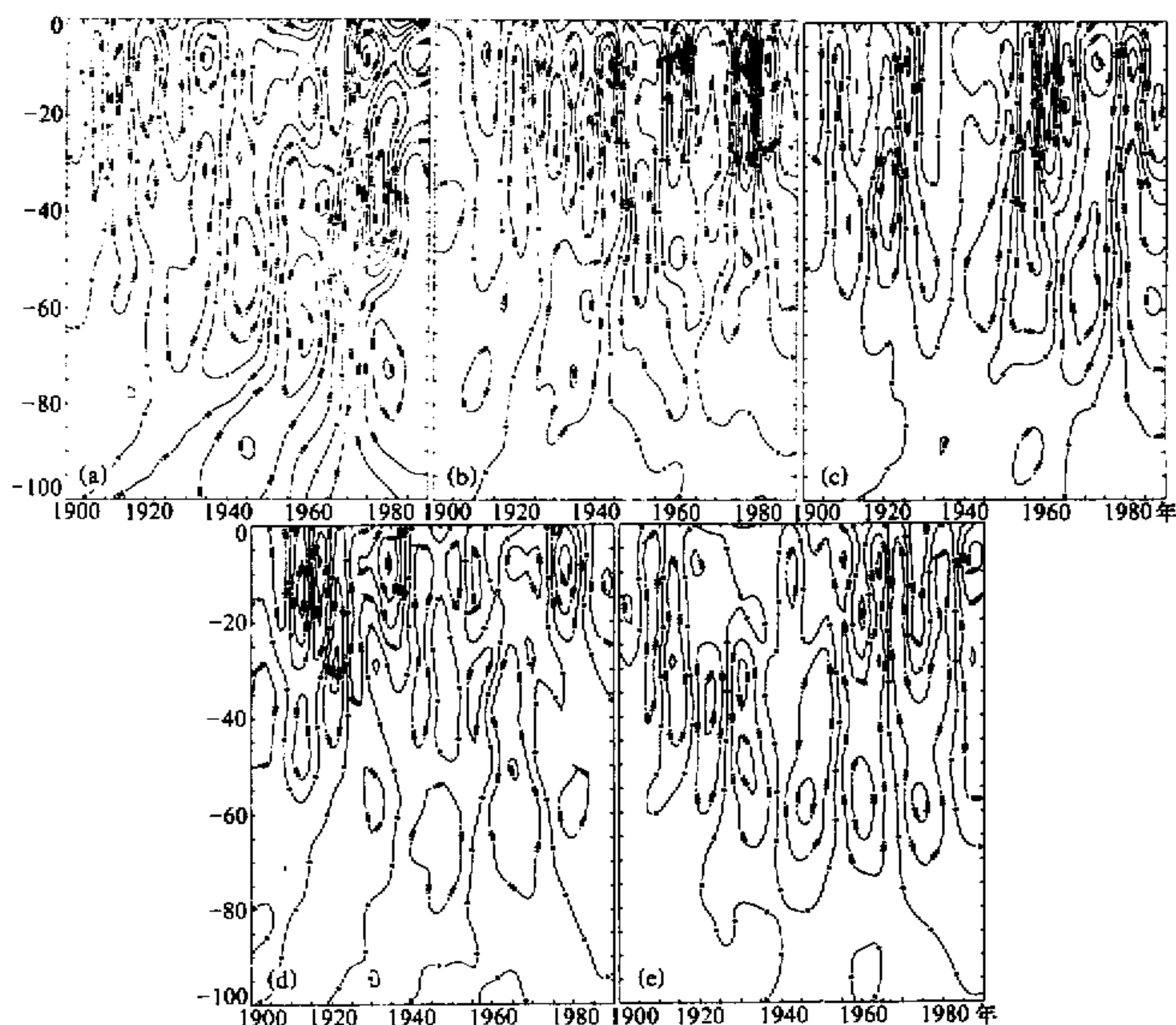


图 5 子波分析

4 亚非季风区夏季降水与赤道东太平洋 SST 的关系

利用中国格点平均降水量、距平百分比及 Gamma 指数序列, 分别计算了它们与 SST 的滞后相关, 如图 7 所示。横坐标为滞后时间, 冬^{-1} 表示中国夏季降水与前一年冬季 (即前一年 1、2 月和前二年 12 月) SST 的相关, 冬^0 表示夏季降水与该年冬季 SST 的相关, 冬^{+1} 表示夏季降水与后一年冬季的相关, 其他依次类推, 纵坐标为相关系数, 水平横线分别为 95% 的置信度线及零线。实线为 Gamma 指数序列, 虚线为降水量序列, 点线为降水距平百分比序列。我们看到, Gamma 指数序列与 SST 相关最好, 并在前一年夏季达到最大正相关, 超过 99% 的信度值。这说明 SST 的变化超前于中国夏季降水, 也就是说 SST 的变化将反映后一年中国夏季的降水变化。

既然中国夏季平均降水与前一年夏季 SST 相关最好, 而且是显著的, 进一步就需要研究其区域相关。因此我们求出中国 966 个格点与超前一年夏季 SST 的空间相关场, 如图 8 所示。

在分析相关场的特点之前, 我们先要谈一谈相关场的信度问题。通常所说达到

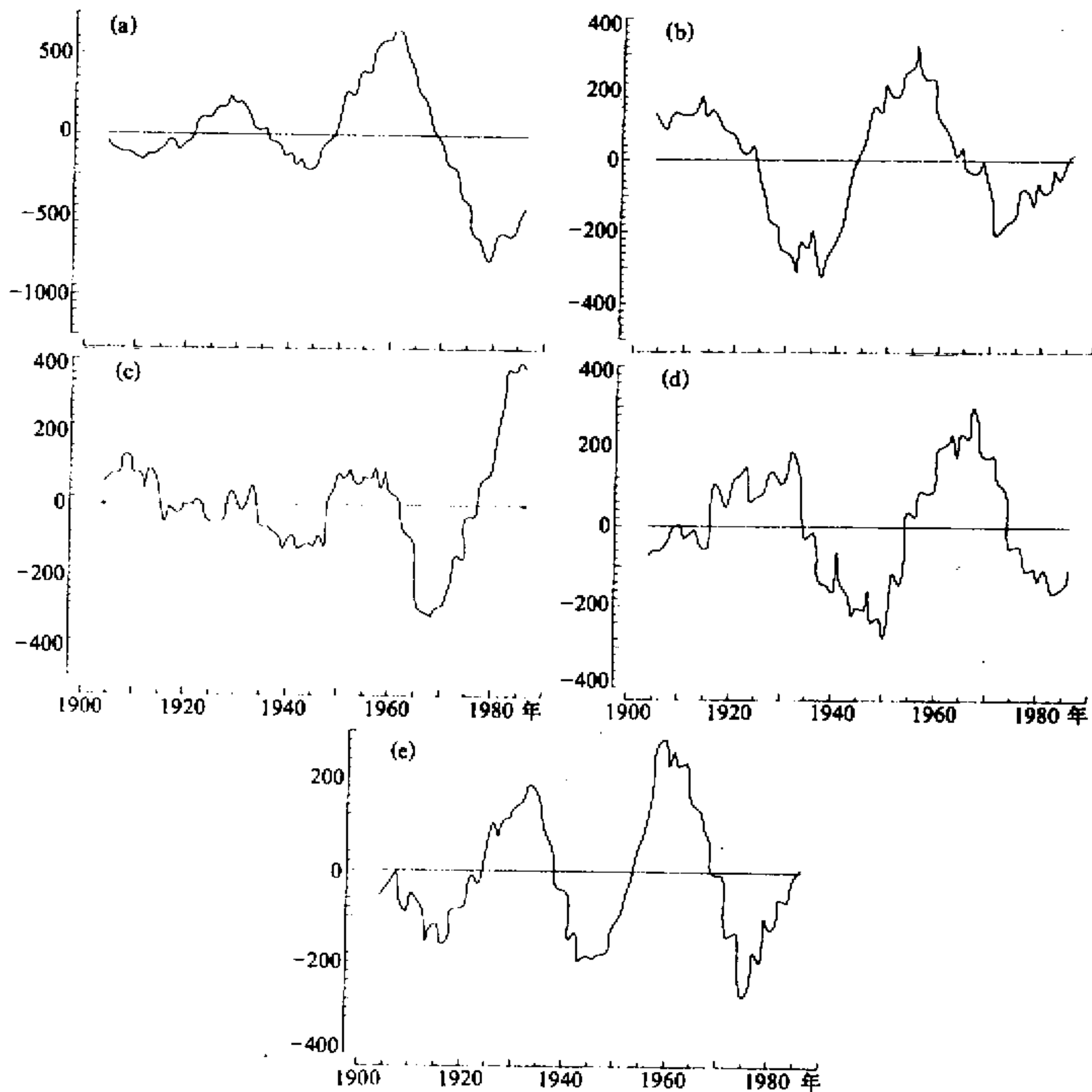


图 6 对应于 35 年左右周期的子波分析横切线

95%的信度, 实际都是单站信度检验的标准。但是我们并不是只计算了一个点, 而是计算整个区域中的所有点, 然后再从整个区域的格点中选出大的相关, 按道理讲, 就不能再用单点相关的检验标准了^[13]。因为对于气象要素相关场而言, 除了各单点序列有时间持续外, 站点或网格点之间气象要素存在着空间依赖关系。例如, 大气中存在很强的遥相关, 在很大范围内要素场的变化位相是一致的。因此, 场的相关最大区是后验相关, 而单点相关为先验相关。关于这个问题文献[13]已作过详细讨论, 这里不再重复。只需扼要说明, 根据我们的检验, 图 8 的相关场已达到 95%的信度, 即统计上有意义。因此, 可以说, 中国夏季降水与超前一年的夏季赤道东太平洋 SST 有很密切的关系。

从图上可以看出, 有两个较大的正相关区, 一个在黄河中游即河套地区, 另一个在新疆北部。还有一个较大的负相关区在江淮流域。等值线分别为单点 99%、98%、95%及 90%的信度。这表明单从赤道东太平洋 SST 的变化来看, 如果某一年夏季 SST

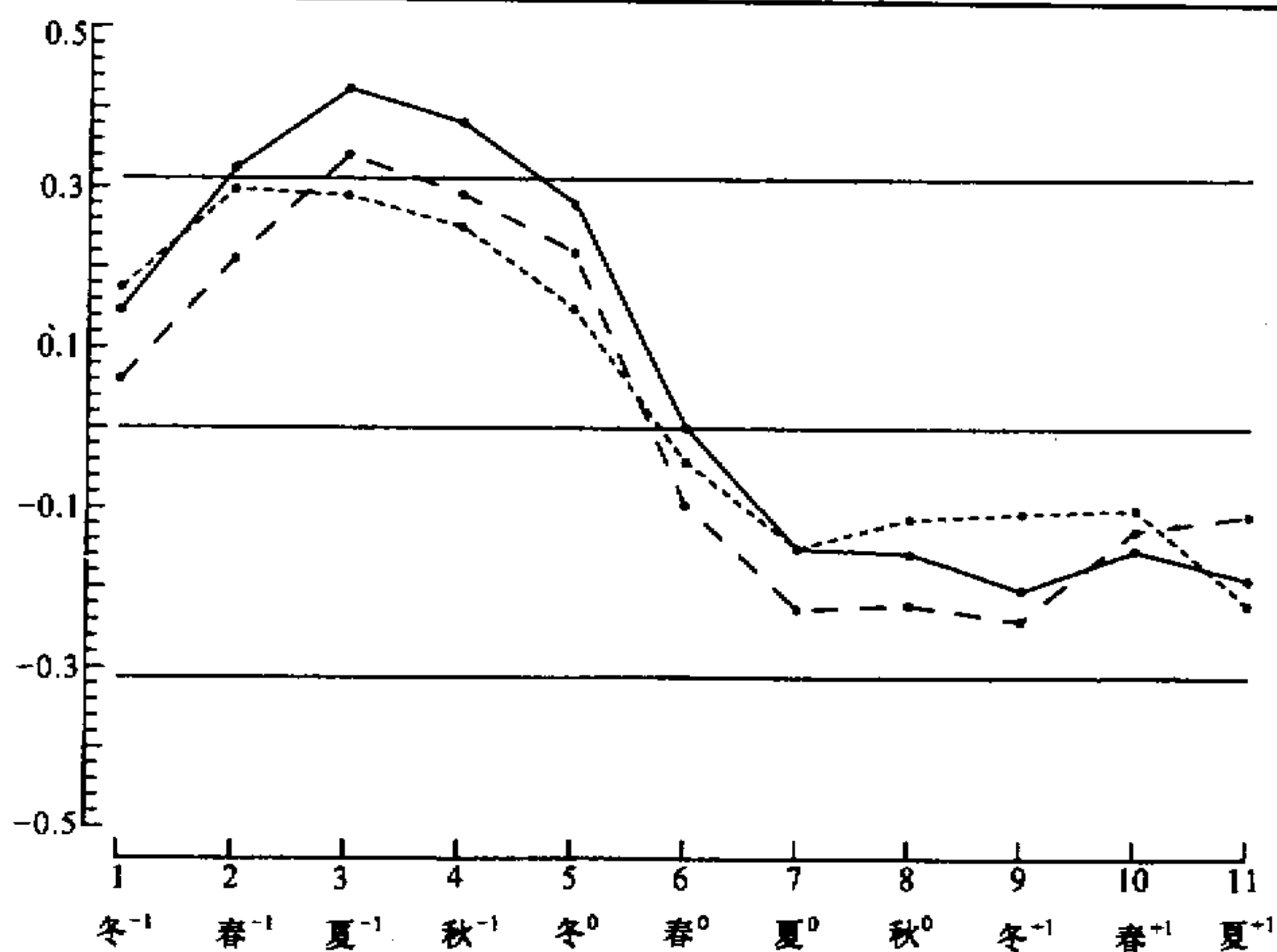


图7 中国夏季降水与赤道东太平洋 SST 的滞后相关

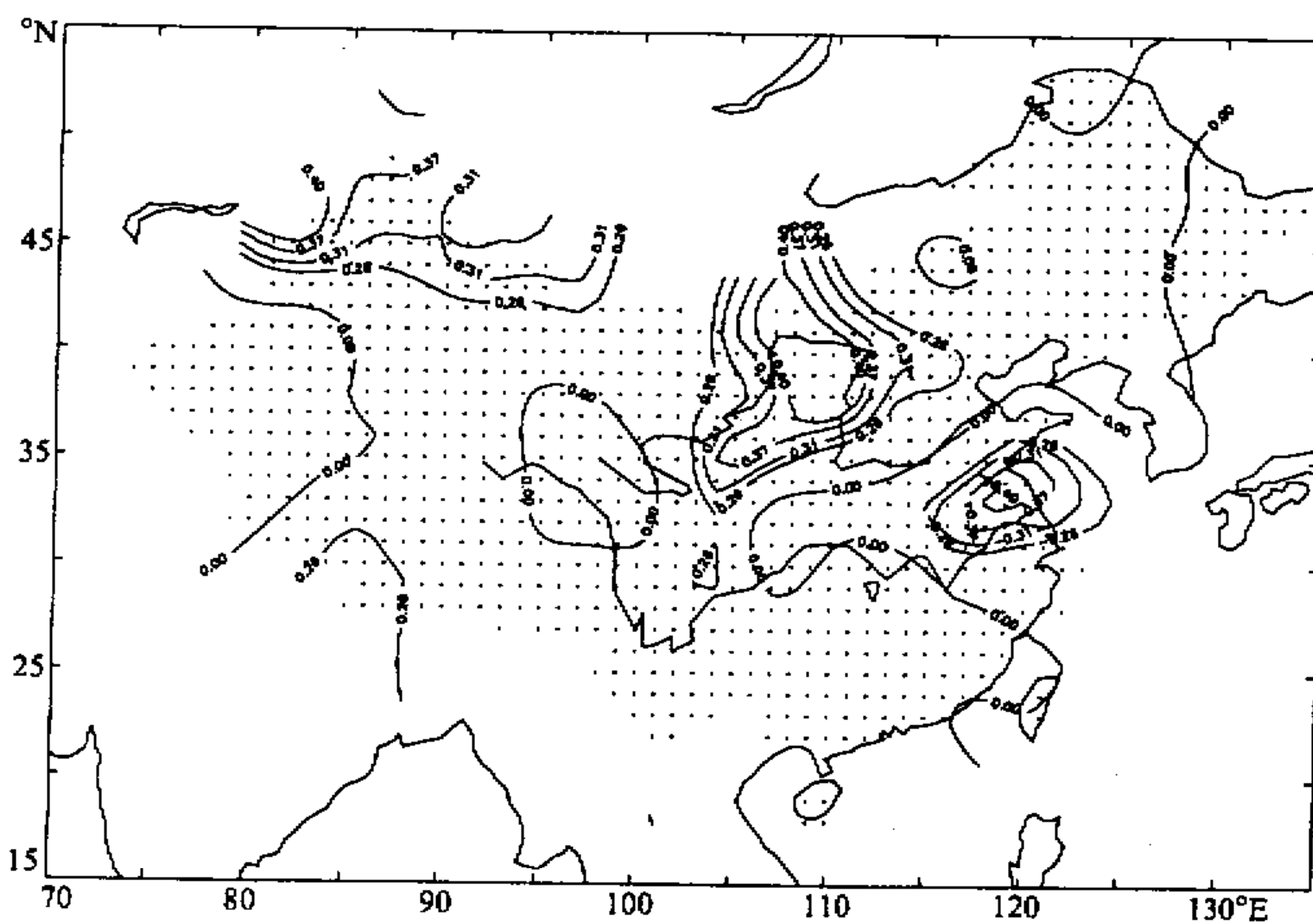


图8 中国夏季降水与超前一年夏季赤道东太平洋 SST 的相关场

偏高，则来年夏季黄河中游及新疆北部降水偏多，而江淮则降水偏少，反之亦然。

另外我们用亚非季风区更长的降水资料进一步证明了这一点（图略）。同时我们发现印度夏季降水与赤道东太平洋 SST 的关系正好与此相反。最显著相关为负且出现在

其后的秋季及冬季 (图 9)。整个区域平均降水与 SST 的相关系数达到 -0.5 , 超过了 99% 的信度值。图 10 则表明, 整个印度半岛夏季降水与其后秋季的赤道东太平洋 SST 均呈负相关。这说明, 印度夏季降水超前于赤道东太平洋 SST, 而 SST 又超前于中国夏季降水。

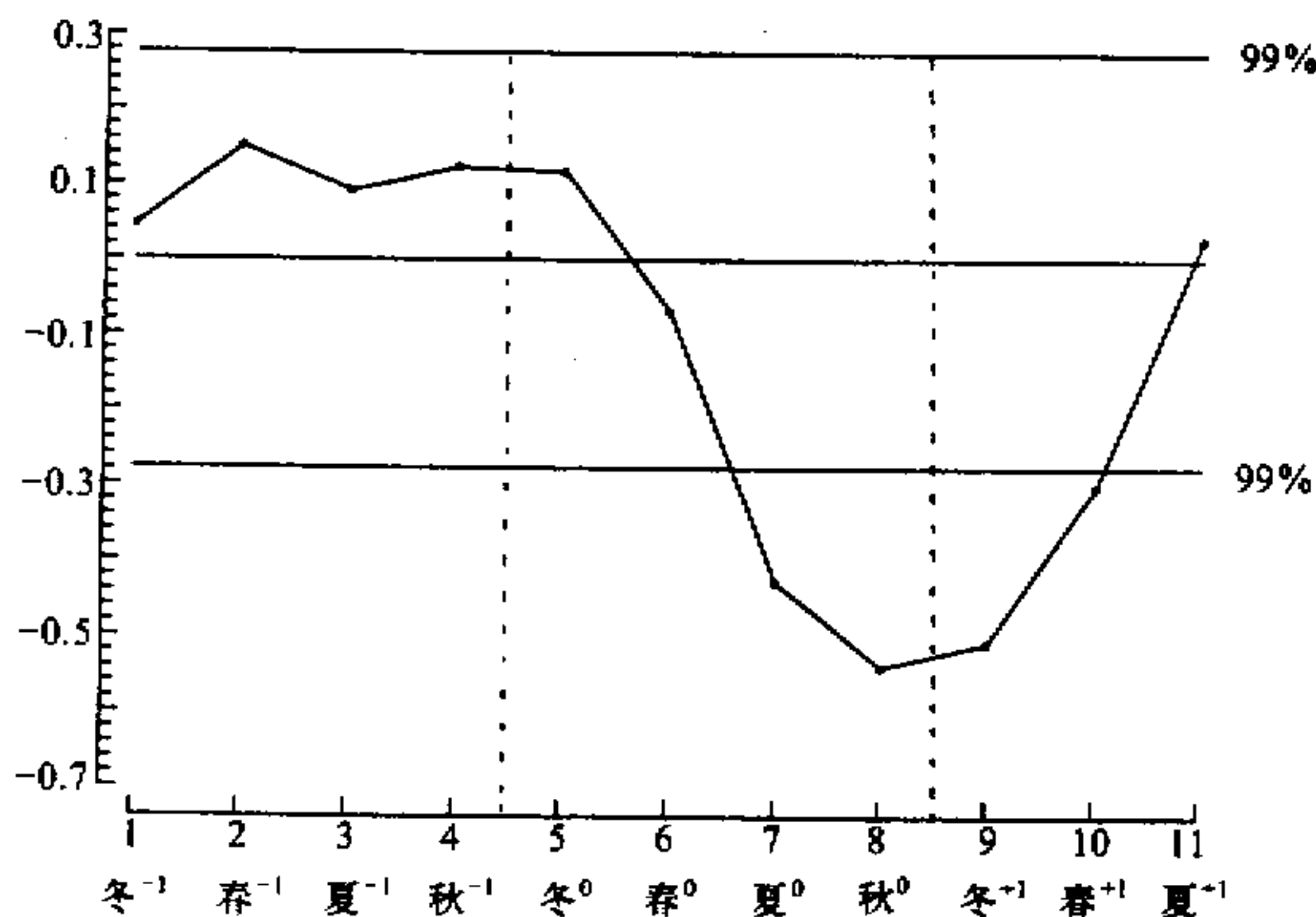


图 9 印度夏季降水与赤道东太平洋 SST 的滞后相关

5 结论

从转动的 EOF 分析出发, 我们发现在亚非季风区里有 5 个比较突出的中心地区, 分别为萨赫勒地区、日本南部到中国长江流域、中国华南—印度半岛东部、热带非洲地区和东北亚地区。通过对这 5 个中心地区的降水研究发现:

(1) 在空间结构上萨赫勒地区与热带非洲地区呈相反变化; 日本南部与中国长江流域变化一致, 与黄河流域及华北变化相反; 印度西北部与中国长江流域变化相反, 与黄河及华北变化一致; 印度半岛东部与中国华南变化相反, 与黄河流域变化一致; 东北亚地区与日本南部变化相反。

(2) 每个中心地区存在着不同的振荡周期, 中国华南与印度半岛东部地区和东北亚地区以三十年左右的周期为主, 日本南部和长江流域则主要是 3 年左右的变化, 萨赫勒地区则以七十多年

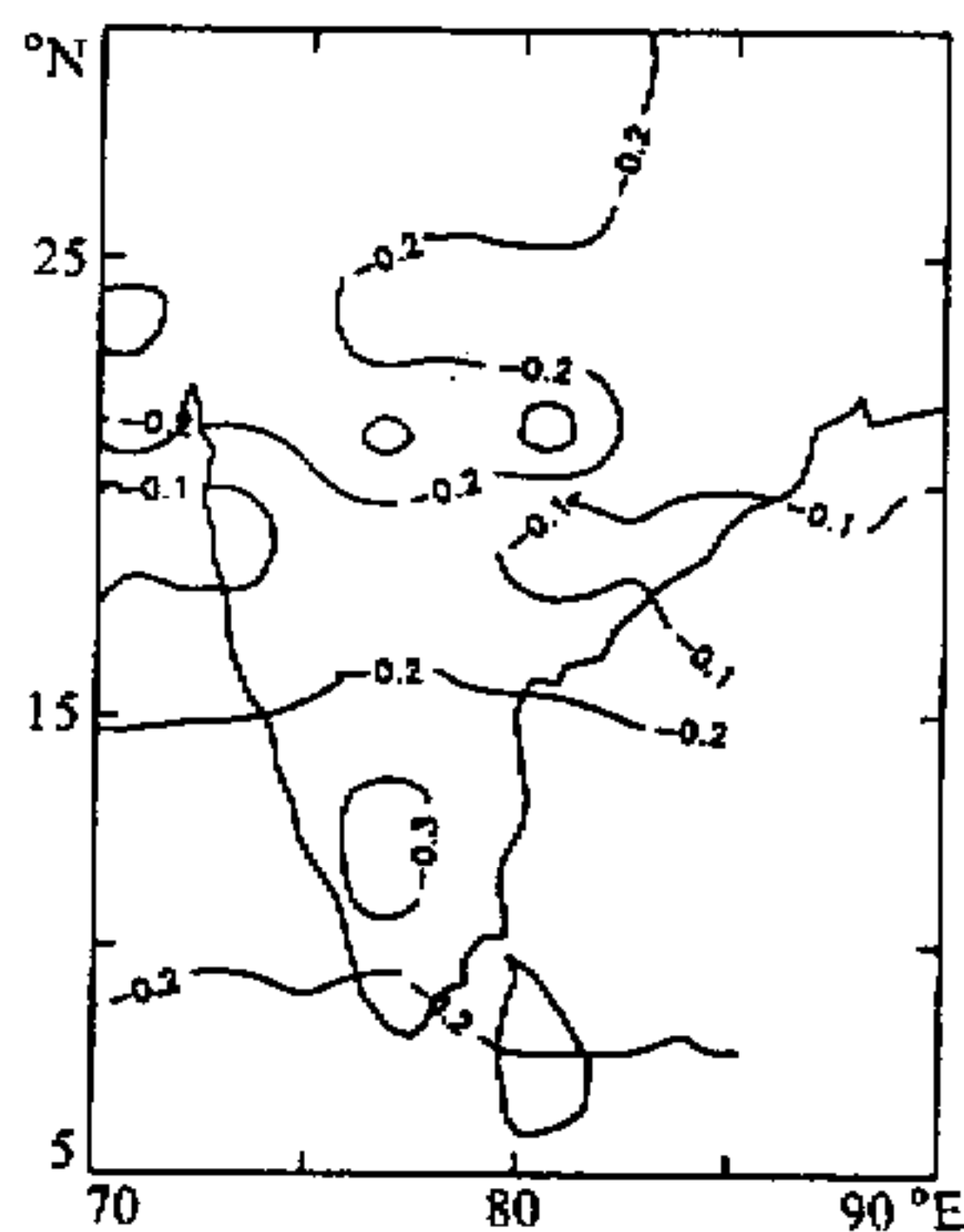


图 10 印度夏季降水与其后秋季的赤道东太平洋 SST 的相关场

的长期趋势为主, 另外也存在年际的振荡周期, 而热带非洲地区的振荡周期则不太明显。

(3) 各地区的降水在不同时段存在不同程度的突变。相邻地区的降水变化规律并不一样, 相反, 地理位置相差甚远的两个地区降水变化则可能非常相似。

(4) 不同地区在不同时段造成降水偏多或偏少的主要频率是不一致的, 有的是单一频率起主要作用, 有的则是多个频率共同作用的结果。

(5) 中国夏季降水与超前一年的赤道东太平洋夏季 SST 呈显著正相关, 而印度夏季降水则与其后秋季的赤道东太平洋 SST 存在很大的负相关。

致谢 本文资料由英国东安吉尼大学 Mike Hulme 博士提供, 特表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 曾昭美、郭其蕴, 1982, 亚非季风区夏季降水与热带东风急流的关系, 大气科学, 6, No.3, 283~291.
- 2 Ramage, C. S., 1971, *Monsoon Meteorology*, Academic Press New York and London.
- 3 高由禧等, 东亚季风的若干问题, 科学出版社.
- 4 叶瑾琳、王绍武, 1995, 近百年全球降水变化, 中国博士后十周年成果展论文集.
- 5 黄嘉佑, 1990, 一种用于旱涝分析的降水概率指标——Gamma 分布概率指标, 气象, 16, No.9, 8~12.
- 6 黄嘉佑, 1988, 转动主分量分析在天气气候分析中的应用, 气象, 14, No.9, 47.
- 7 叶瑾琳、王绍武、李晓东, 中国东部旱涝型的研究, 应用气象学报.
- 8 Bacry, E., Arnendo, A., Frisch, U., Gagne, Y. and Hopfinger E., 1989, *Turbulence and Coherent Structures*, Edited by O. Metais and M. Lesieur, Grenoble.
- 9 Grossman, A. and Morlet, J. 1987, *Mathematics and Physics, Lecture on Recent Results* (ed. L. Streit) World Scientific, Singapore.
- 10 Mike Hulme and Mick Kelly, 1993, Desertification in the Sahel, *Environment*, 35, No.6, 5~45.
- 11 天气分析和预报, 北大地球物理系气象教研室编, 科学出版社.
- 12 王绍武、叶瑾琳, 1995, 近百年全球气候变暖的分析, 大气科学, 19, No.5, 1~9.
- 13 王绍武、胡增臻, 1992, 气象要素相关场显著性检验的统计模拟方法, 长江黄河旱涝灾害发生规律及其经济影响的诊断研究, 王绍武等著, 215~221.

Variability of Summer Rainfall in the Monsoon Region of Asia-Africa

Ye Jinlin Wang Shaowu and Li Xiaodong

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Zhao Zongci

(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract Variability of summer rainfall in the monsoon region of Asia-Africa was examined on the basis of gridded monthly precipitation time series by using gamma percentile as the rainfall index. REOF analysis was carried out for the gamma percentile series. Each of the first five REOFs mainly shows the characteristics in a single area. They are Sahel, South Japan-lower reaches of Changjiang and Huaihe River, South China-India, tropical Africa and north-east Asia. Some advanced methods were put to use such as wavelet analysis. The relationship between SST in east equatorial Pacific and precipitation in the monsoon region was also studied.

Key words variability Gamma percentile REOF analysis wavelet analysis