

## 十五世纪以来南方涛动指数与北太平洋海温场的重建

宋洁\* 张先恭  
(国家气象局气象科学研究所)

### 提 要

本文利用中国近五百年旱涝等级资料,用典型相关的方法重建了15世纪以来的南方涛动指数(SOI)和北太平洋海温(SST)场。在SOI的重建中校准了1913—1973年校准期方差的40%,在1852—1912年的独立验证期验证了方差的20%;在北太平洋SST的重建中校准的方差较高,其中赤道东太平洋SST的校准方差达60%,在近100年的定性检验中效果也很好。说明用中国历史时期的旱涝资料能够在一定程度上重建出历史时期的ENSO事件。

通过对15世纪以来SO和SST重建值的分析发现,ENSO事件不但具有明显的周期性,而且还有250年左右的阶段性变化。SO和SST不仅存在2—7年公认的周期,而且历史上SO还有10.6年、赤道东太平洋SST还有25—28.5年及100年左右与太阳活动有关的周期。进一步分析还得出,18、19世纪及20世纪前期SO低指数事件发生相对较少,15世纪后期、16、17世纪及20世纪后期SO低指数事件发生较多,且历史上的低指数多发期与气候上的冷期一致,而低指数少发期则与气候上的暖期一致;气候上的干旱(湿润)期则与东太平洋长期偏冷(暖)、西太平洋长期偏暖(冷)相对应。

### 一、引 言

热带地区的海气相互作用主要表现在厄尼诺现象和南方涛动(ENSO)之间的密切联系之中。它们的变化对全球大部分地区的气候有着显著的影响。为了解ENSO与气候变化的原因,重建过去的南方涛动指数,找出在更长时间尺度上ENSO事件发生的史实是很必要的。19世纪中期,当仪器记录的天气资料被广泛使用之前,关于南方涛动指数和北太平洋海温的变化以及它们对气候的影响知道得很少。Quinn等(1978)<sup>[1]</sup>为了调查自1763年以来发生的与SO的低指数位相有关的厄尼诺现象,他们把早期的仪器记录和文献记载的信息结合起来,定出了一些ENSO事件的发生年代。Lough和Fritts(1985)<sup>[2]</sup>曾用北美西部65个树木年表,依据古气候方法分析南方涛动,并重建了1600年以来的南方涛动指数。重建结果大约校准了SO方差的50%,并有20%的方差在一独立时段得到了检验。Lough等(1987)<sup>[3]</sup>曾用北美树木年表重建了北太平洋海平面气压和北美降水,并分析了它们与中

本文1988年10月14日收到,1989年8月7日收到修改稿。

\* 现在国家海洋局海洋环境预报中心工作。

国旱涝的关系。发现当中国降水落后于北太平洋海平面气压和北美降水一年时,它们之间有非常显著的统计联系。许多人根据中国近五百年旱涝资料,研究了中国历史时期旱涝分布的时空变化,并与世界其他地区的气候变量进行了比较,发现中国旱涝的变化不仅与北半球大气环流有密切关系,而且还与南半球环流有关<sup>[4]</sup>。并根据这份资料重建了中国夏季降水距平、西太平洋副热带高压指数和南方涛动指数<sup>[5-8]</sup>。

考虑到中国旱涝与南半球环流以及与重建的北美气候的相关联系,加之中国旱涝具有相当长的时序,因此,本文根据中国近500年旱涝等级资料以及有仪器观测记录的南方涛动和北太平洋海温资料作了重建历史时期南方涛动低指数和北太平洋海温场的尝试。

## 二、重建的方法

这里是采用典型相关的方法将两组变量的关系归结到最小的新变量集合中,以简化问题的复杂性。

设两组变量,一组为旱涝序列  $x_i (i = 1, 2, \dots, p)$ , 一组为气候要素  $y_j (j = 1, 2, \dots, q)$ , 样本长  $n$ , 其距平的矩阵形式记为  ${}_n X_p$  和  ${}_n Y_q$ , 欲求这两组变量之间的最大相关, 则要先对原始变量  ${}_n X_p$  和  ${}_n Y_q$  作如下变换<sup>[9]</sup>:

$${}_n W_g = {}_n X_p \cdot A_g \quad (1)$$

$${}_n Q_g = {}_n Y_q B_g \quad (2)$$

$$g = \min(p \cdot q)$$

其中  ${}_n W_g$  与  ${}_n Q_g$  皆自正交, 其变量的方差都等于1, 且  ${}_n W_g$  中的一个变量只与  ${}_n Q_g$  中的一个变量相关。线性变换系数  ${}_g A_g$  与  ${}_g B_g$  还必须满足两组新变量之间的相关为最大, 即如:

$$\frac{1}{n} W'_g \cdot Q_g = {}_g A_g \quad (3)$$

${}_g A_g$  是典型相关系数的对角矩阵, 值从大到小排列。将(1)(2)式代入(3)化简得到:

$${}_n \hat{Y}_g = {}_n X_p A_g A_g B_g^{-1} \quad (4)$$

令  ${}_g T_g = {}_g A_g A_g B_g^{-1}$

则  ${}_n Y_g = {}_n X_p \cdot T_g$

${}_g T_g$  称为转移函数。用来确定转移函数的时段称为校准期, 而由  ${}_n X_p$  通过转移函数得到的  ${}_n Y_g$  需要在另一独立时段进行检验, 这时段称为验证期。

从校准期与验证期的统计量  $R^2$  和  $RE$  可以检验重建结果的可靠性。其中  $R^2$  为实际值与重建值相关系数的平方, 类似于被解释的方差, 正的  $RE$  表示缩减误差。

$$RE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_c)^2}$$

$y_i$  为实测值,  $\hat{y}_i$  为重建值,  $\bar{y}_c$  为校准期的平均值。 $RE$  可以从较大的负值到正1, 只要  $RE$  大于零就表示在回归估计中包含着一些有用的信息。

### 三、南方涛动与海温场的重建

#### 1. 资料与重建过程

南方涛动指数的重建需要有一套连续可靠,并尽可能长的 SO 指数序列,以保证有足够长的校准期和验证期。Wright(1975)<sup>[10]</sup>给出了 1851—1974 年 SO 指数的季节值。这是到目前为止所知道的最长的 SO 记录。该指数是以 2—4 月为春,5—7 月为夏,8—10 月为秋,11—1 月为冬,称为 SO 季节。这样划分季节时,从一个季节到另一个季节的自相关比取其他任何季节组合要小得多。此外,SO 季节的每一个季节值是由独立资料得到的,时间序列没有经过平滑。

北太平洋海温资料取 1949 年 1 月—1986 年 12 月逐月格点海温,范围自 120°E—80°W, 10°S—50°N,间隔为 5°,共 286 个格点。

根据重建方法对南方涛动与海温进行重建的过程如图 1 所示:

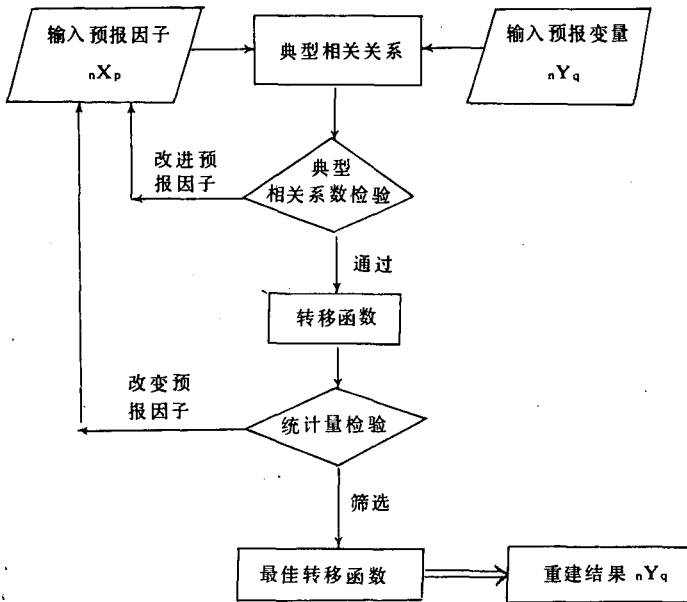


图 1 南方涛动与海温场的重建过程框图

#### 2. 南方涛动指数的重建

考虑到南方涛动指数与其前期和后期旱涝的相互关系,计算中预报因子  $nX_p$  取前 2 年、前 1 年、当年和次年中国旱涝的前 4 个时间系数(即  $p=16$ ),预报量  $nY_q$  则为 SOI 的四个季节值( $q=4$ )。

在重建中取 1852—1912 年为校准期,1913—1973 年为验证期,建立模式 I;以 1913—1973 年为校准期,1852—1912 年为验证期,建立模式 II;模式 I、II 最后均以 1974—1985 年 CAC(美国气候分析中心)的 SOI 作为独立资料进行验证。比较模式 I、II 的计算结果(见

表 1), 可以看到, 模式 I 的校准与验证方差均较低, 且  $RE$  在夏冬两季出现负值。而模式 II 的校准方差为 31.4—46.8%, 平均 40.2%, 验证方差为 12.9—26.3%, 平均 20.1%,  $RE$  均大于零, 且以 1974—1985 年独立资料为验证期的验证方差最大达 58.2%, 平均为 41.8%。显然模式 II 优于模式 I, 故重建过程中以模式 II 对 SOI 进行了重建。与 Fritts 用树木年表重建的 SOI 对比, 他校准了 SOI 方差的 50%, 验证了 SOI 方差的 20%。虽然用旱涝资料重建的校准方差略低于 Fritts 的校准方差, 但重建的验证方差可与之相比, 且这里的校准与验证期均长于 Fritts 的时期, 特别是又在 1974—1985 年的独立时段进行了验证, 这就可以进一步证明重建结果的可靠性。

表 1 重建 SOI 的统计表

模式	项目	2—4 月	5—7 月	8—10 月	11—1 月	置信限达 95% 以上的
I	校 $R^2$	0.205	0.200	0.223	0.215	典型相关系数 通过 1 个
	准 $RE$	0.189	0.185	0.200	0.186	
	验 $R^2$	0.121	0.071	0.128	0.097	
	证 $RE$	0.100	-0.186	0.077	-0.132	
	$R^2^*$	0.144	0.122	0.288	0.166	
II	校 $R^2$	0.314	0.468	0.383	0.442	典型相关系数 通过 3 个
	准 $RE$	0.182	0.368	0.263	0.327	
	验 $R^2$	0.129	0.205	0.263	0.208	
	证 $RE$	0.014	0.142	0.246	0.324	
	$R^2^*$	0.338	0.364	0.389	0.582	

表中 \* 号表示为独立验证期

表 2 SOI 低指数年

表 2 SOI 低指数年

世 纪		低指数年份						次数
15	后半期	1472	1473	1484	1488	1493	1499	6(28年)
16	前半期	1500	1509	1514	1515	1521	1524	12
	后半期	1526	1528	1529	1533	1539	1545	
17	前半期	1560	1561	1563	1568	1581		10
	后半期	1585	1586	1590	1595	1596		
18	前半期	1600	1609	1610	1615	1616	1617 1626 1634	10
	后半期	1637	1638					
19	前半期	1650	1660	1661	1667	1671	1672 1679 1682	11
	后半期	1689	1690	1698				
20	前半期	1704	1707	1721	1722	1729	1740	6
	后半期	1758	1759	1768	1782	1783	1792	
19	前半期	1803	1812	1817	1825	1833	1836 1838	7
	后半期	1857	1875	1876	1877	1884	1899	
20	前半期	1900	1905	1907	1918	1919	1928 1930 1941	8
	后半期	1951	1953	1957	1959	1965	1967 1968 1972	
		1979	1982					10(36年)

根据重建的 SO 季节值,将至少有两个季的估计值低于平均值一个标准差的年代定义为低指数年,从而给出了1472—1985年中的低指数年份。统计15世纪以来每50年低指数年出现的年数(见表2),可以看到,18、19世纪 SO 低指数事件发生得较少,平均每50年发生6—7次;16、17及20世纪 SO 低指数事件发生得较多,平均每50年有10—12次。

图2为15世纪以来南方涛动指数的距平累积曲线,根据这条曲线可以将历史时期 SOI 的变化分为若干阶段(见表3)。

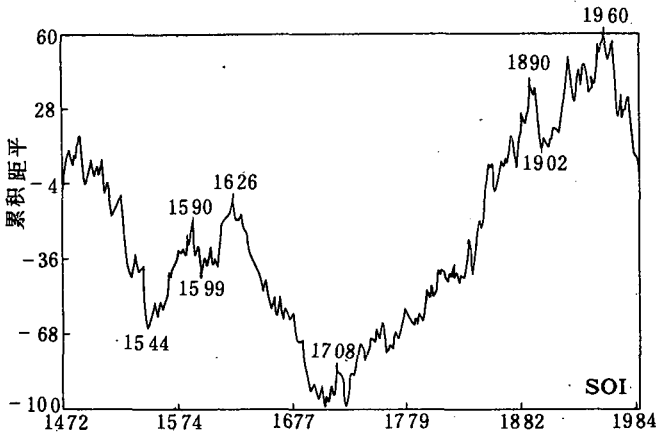


图2 1472—1985年 SOI 的距平累积值

表3 15世纪以来 SOI 距平累积曲线的阶段划分

阶段	时期	上升期		下降期	
		年份	持续期	年份	持续期
下降期	1472—1708年 (237)	1545—1590年	46	1472—1544年	73
		1600—1625年	26	1591—1599年	9
				1626—1708年	83
上升期	1709—1960年 (252)	1709—1890年	182	1891—1902年	12
		1903—1960年	58		
下降期	1961—				

从表3中可以看到,15世纪以来南方涛动指数可划分出3个大的阶段。1472—1708年为曲线的下降期,是南方涛动低指数多发期,这个阶段持续了237年;从1709—1960年为曲线的上升阶段,是南方涛动低指数少发期,这个阶段持续了252年;从1961年起又进入低指数多发期。另外,在每一个大阶段中还有一些长短不等的小振动。本世纪60年代以来大范围气候异常的频繁出现可能与1961年又进入 SO 低指数多发期有关。

竺可桢(1972)<sup>[11]</sup>根据文史资料将近500年我国的气候划分出3个冷期,即1470—1520年,1600—1720年和1840—1890年,特别是其中1650—1700年最冷。其间还有两次相对温暖的时期,即1550—1600年和1720—1830年。将这些冷暖期与表4对照,其中第1个冷期和

第2个冷期分别与表4中1472—1544年和1626—1708年两个SO低指数多发期对应,而两个暖期则与表4中1545—1590年和1709—1890年两个SO低指数少发期相对应。只有第3个冷期(1840—1890年)没有找到对应关系。由此可以认为,SO低指数年大多发生在气候上的寒冷时期;而SO低指数少发期则与气候上的温暖时期相对应。本世纪50年代以来气候又转向偏冷,仅在1950—1985年这36年内SO低指数事件就发生了10余起。这个结果表明,冷期中易发生气候异常,而暖期则气候比较稳定。

图3为15世纪以来南方涛动指数的功率谱。从图中可以看到,历史时期SOI在春、夏、冬3个季节具有10.6年的周期,在秋、冬季具有7.7年周期,在夏、秋、冬季具有5—2.3年周期。与1935—1986年SOI(CAC)实际值的功率谱比较可看出,历史时期南方涛动的活动不但存在2.3—7.7年活动周期,而且还存在10.6年的周期。Fritts用树木年表重建的1600年以来的SOI也发现有10.6年周期。可见南方涛动指数的10.6年周期可能是存在的。

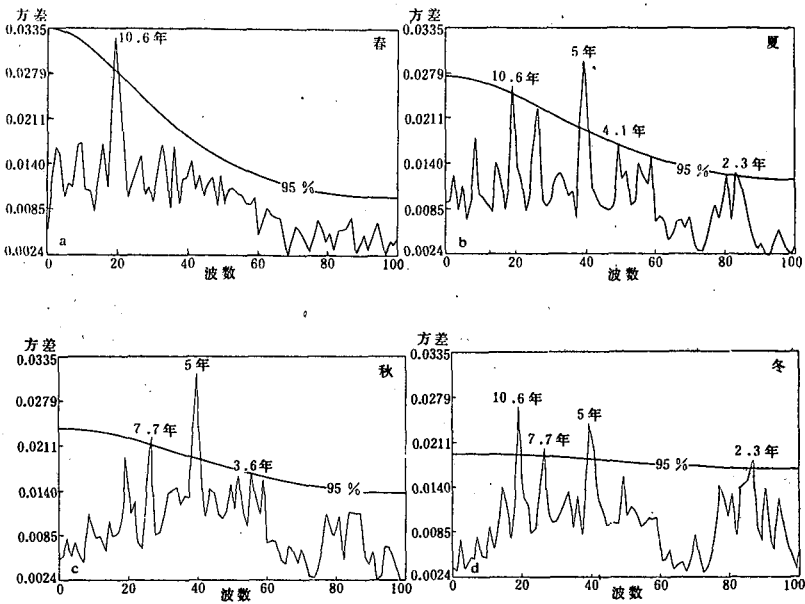


图3 南方涛动指数重建值的功率谱  
(a)春(b)夏(c)秋(d)冬

### 3. 北太平洋海温场的重建

首先对1949—1985年逐月北太平洋海温距平场按SO季节作EOF展开,然后以前一年、当年和次一年占旱涝总方差93%的前5个时间系数作为预报因子 $X_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ ,取占总方差80%的海温场前11个时间系数作预报量 $Y_j$ ,进行重建,最后将重建出的时间系数乘以其相应的特征向量,即恢复出历史时期的海温距平场。

表4为逐季北太平洋海温场前11个时间系数校准期的统计结果。由于海温资料只有37

年,故模式中将其全部用于校准。因此,模式中的校准方差在筛选转移函数中是一个主要的判断标准。表4中第1系数的校准方差均较高,特别是秋季和冬季,它们分别达84.5%和47.9%,其它系数各在不同的季节校准方差较高。

表4 以1949—1985年为校准期重建北太平洋海温场前11个系数所得统计量

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
春	$R^2$	0.366	0.150	0.195	0.566	0.100	0.104	0.476	0.304	0.174	0.288	0.96
	$RE$	0.418	0.279	0.076	0.405	0.182	0.192	0.415	0.445	0.197	0.276	0.152
夏	$R^2$	0.232	0.120	0.174	0.120	0.166	0.228	0.123	0.260	0.475	0.367	0.264
	$RE$	0.400	0.041	0.327	0.180	0.227	0.318	0.123	0.245	0.465	0.410	0.329
秋	$R^2$	0.845	0.100	0.203	0.205	0.130	0.145	0.151	0.362	0.144	0.167	0.176
	$RE$	0.602	0.256	0.214	0.323	0.243	0.171	0.183	0.354	0.125	0.179	0.156
冬	$R^2$	0.479	0.338	0.413	0.172	0.117	0.315	0.325	0.240	0.193	0.149	0.153
	$RE$	0.619	0.406	0.481	0.172	0.207	0.215	0.465	0.013	0.226	0.126	0.149

校准方差可以部分地衡量重建效果,但仅从时间系数的校准方差大小还难以判断在不同区域的重建效果,故将重建的海温场与同期实际的海温场作相关比较(图略)。结果表明,北太平洋大部分地区相关系数达0.5以上,超过了0.001的信度。特别是在赤道东太平洋地区,相关系数在各季均为0.7以上。若从赤道东太平洋(0—10°S,180—90°W)海温的平均情况看,则春、夏、秋、冬四季的相关系数分别是0.807,0.731,0.850及0.863。可见,重建值能够解释实际海温场变化的大部分方差,特别是在赤道东太平洋地区,重建结果平均能够解释60%以上的方差。

由于赤道东太平洋海温的升高常与南方涛动指数的降低联系在一起,其春、夏、秋、冬四季的相关系数分别为-0.655,-0.569,-0.795和-0.791(样本数为38年,均超过了0.001信度)。图4给出了冬季赤道东太平洋海温的重建值与实际SOI的比较。其中1851—1948年的海温是独立的重建值,可以看到,两者的变化趋势不但在校准期,而且在近100年的独立验证期也几乎完全相反。这间接地表明赤道东太平洋海温的重建是可信的。

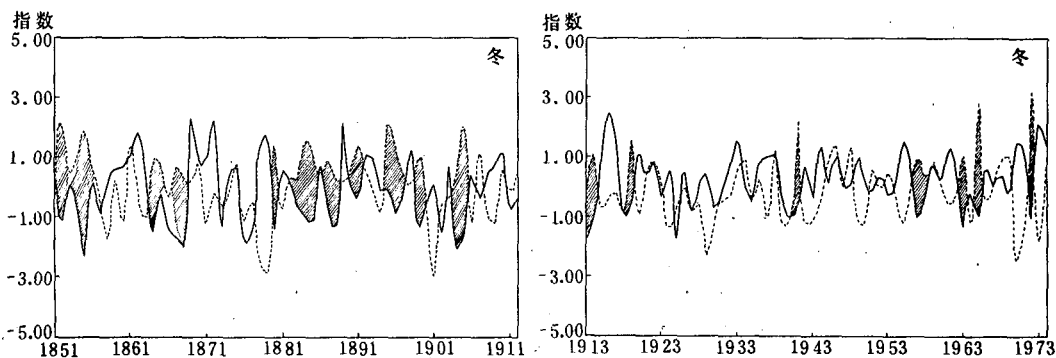


图4 1851—1974年冬季Wright的SOI(实线,单位 $\sigma$ )与赤道东太平洋SST距平重建值(虚线,单位 $\times 0.5^\circ\text{C}$ )

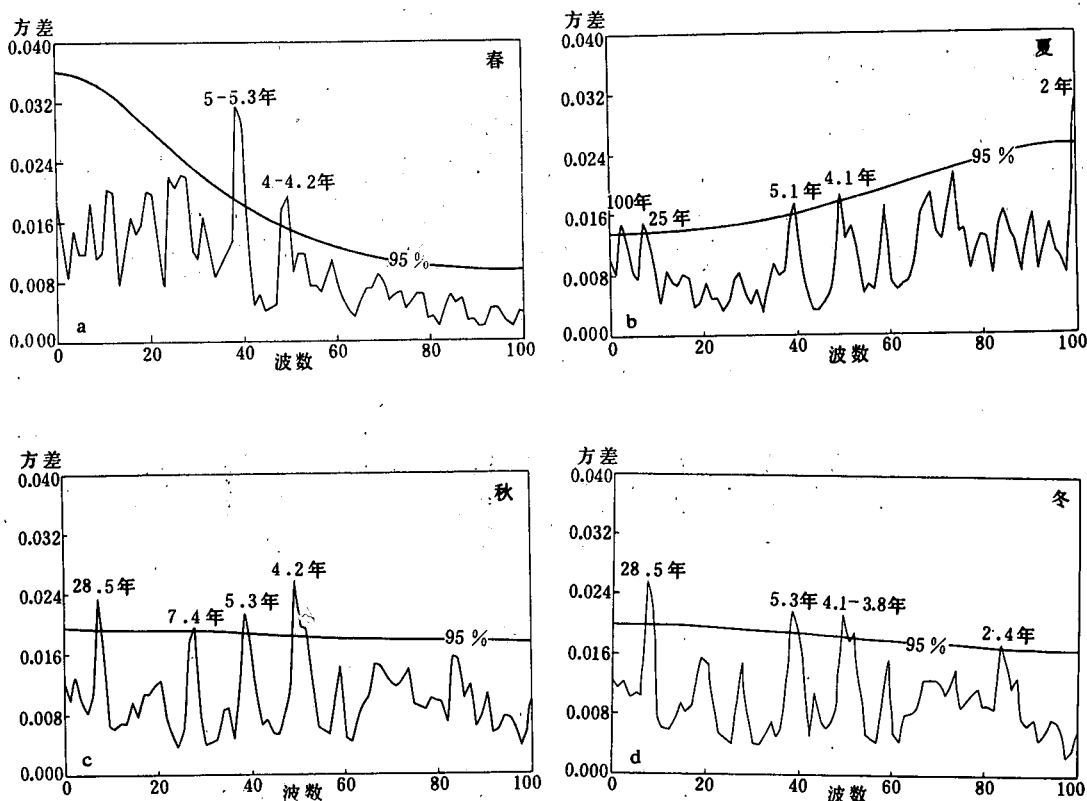


图5 赤道东太平洋海温重建值的功率谱  
(a)春(b)夏(c)秋(d)冬

图5是1471—1985年赤道东太平洋海温重建值的功率谱。可以发现历史时期赤道东太平洋海温的变化不但存在2—5.3年的周期,而且除春季外,还存在25—28.5年的活动周期,夏季还存在100年左右的世纪周期。赤道东太平洋海温重建值中25—28.5年和100年的周期可能与太阳活动的磁周期和世纪周期有关。

为了进一步从各个侧面了解并验证重建的北太平洋海温场的可靠性,将 Fritts (1980)<sup>[12]</sup>利用北美65个树木年表重建的1602—1962年北太平洋地区海平面气压场与我们重建的海温场作比较,发现北太平洋海平面气压场与北太平洋海温场是相互配合的。比较典型的是1841—1850年与1631—1640年海平面气压场形式截然相反,而与此同期的北太平洋海温分布也呈现出两种相反的形势(图略)。当赤道东太平洋偏冷,西太平洋偏暖时,北太平洋海平面气压偏低,中心在中纬度日界线附近;相反,当赤道东太平洋海温偏暖,西太平洋偏冷时,北太平洋海平面气压偏高,中心在中纬度东太平洋150°W 附近。

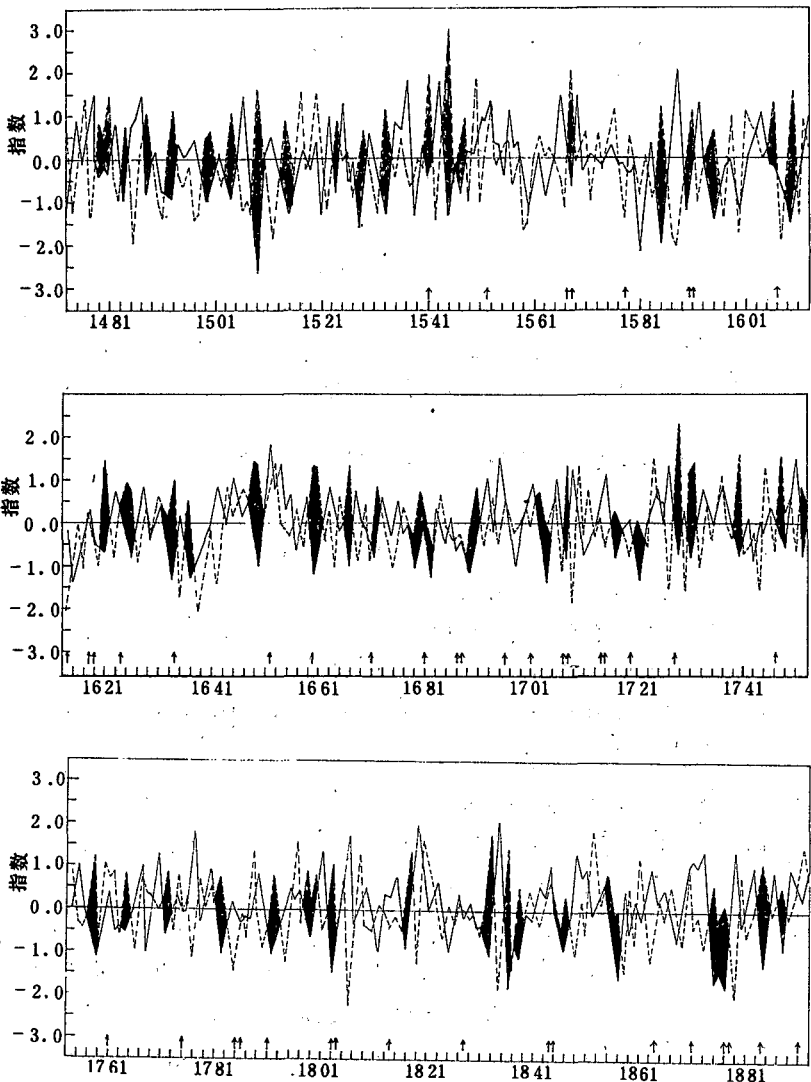
又将历史上的与干、湿气候期相应的北太平洋海温场作比较分析,发现干、湿期所对应的海温场有明显的差异。在几个典型的干旱期,北太平洋东部及赤道的海温距平偏低,西部距平偏高。湿润期的海温场分布则与干旱期相反(图略)。由此可以说明,我国东部历史上的持续干旱(湿润)、特别是华北地区与东太平洋的长期偏冷(暖)和西太平洋的长期



偏暖(冷)相对应。

#### 4. 与历史上 ENSO 事件的比较

根据重建的 SOI 与赤道东太平洋海温,我们画出了历史上的 ENSO 事件(图6)。图上箭头为 Quinn 等(1986)\* 依据文献记载所确定的16世纪中叶以来的44个强厄尼诺事件。比较两者结果得出,两者完全一致的占50%,相差一年的占21%,相差2—3年的占20%,没有模拟出的占9%。此外,这里还重建出了16世纪以前 Quinn 没有定出的厄尼诺年。



\* Quinn, W. H. and V. T. NaI, (1986), Preliminary Report on El Nino Occurrences over the Past Four and a Half Centuries.

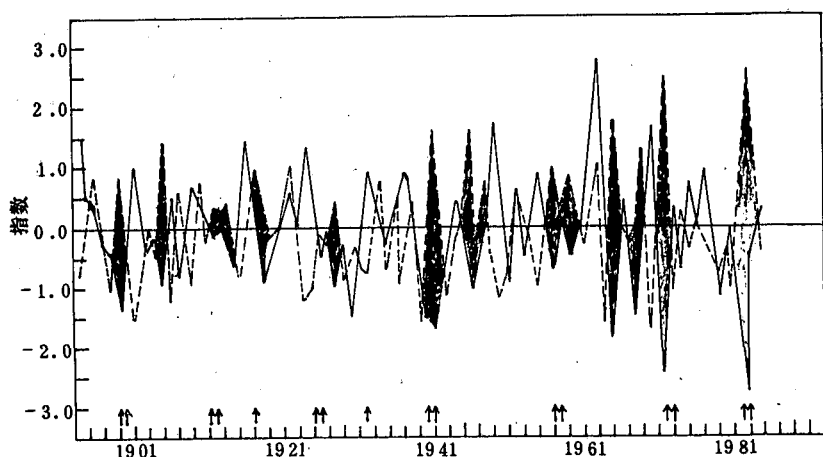


图6 15世纪以来 SOI(实线,单位 $^{\circ}$ )和赤道东太平洋 SST 距平(虚线,单位 $\times 0.4^{\circ}\text{C}$ )的重建值(图中箭头为厄尼诺年)

#### 四、讨 论

虽然本文在用中国历史时期的旱涝重建 SOI 与北太平洋 SST 的过程中,假定有仪器记录时期的气象要素之间的关系可以不变地延用到历史时期,而且由于旱涝的等级划分比较粗,在由文字记载向定量转化中也可能由于人为因素产生一定的误差,但是从对 SOI 的重建结果看,校准方差(40%)和验证方差(20%)与 Fritts 用树木年轮重建 SOI 的校准方差(50%)和验证方差(20%)比较效果差不多。但本文延长了 SOI 的序列,补充了17世纪以前的一些 SO 低指数年。在北太平洋 SST 场的重建中,第一时间系数(占20—36%的方差)的校准方差平均为48%,其中赤道东太平洋校准方差达60%。由于定量可靠的海温资料较短,无法用海温进行直接的验证,但通过近100年的定性检验以及与其他要素场的相关分析中,说明海温场的重建值具有一定的可靠性。如果在资料上和重建的模式上加以改进,可能会得到更高的方差比。

本文还认为,用中国近500年旱涝资料重建南方涛动指数与赤道东太平洋海温的工作得出了一些有意义的结果,对过去发生的 ENSO 事件作统计分析这不仅有助于了解历史时期 ENSO 的活动规律,而且对于今后的长期预报是有意义的。

#### 参 考 文 献

- [1] Quinn, W. H. et al., Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño, and Indonesian droughts, *Fishery Bulletin*, 76, 663—678, 1978.
- [2] Lough, J. M. and H. C. Fritts, The Southern Oscillation and tree rings: 1600—1961, *J. C. A. M.*, 24, 952—966, 1985.
- [3] Lough, J. M., H. C. Fritts and Wu Xiangding, Relationships between climate of China and North America over the past four centuries; a comparison of proxy records, In: Ye Duzheng et al. (eds.), *The Climate of China and Globe Climate*,

China Ocean Press, Beijing, 89—105, 1987.

- [ 4 ] Zhang Jiacheng (ed. ), The Reconstruction of Climate in China for Historical Times, Science Press, Beijing, 1988.
- [ 5 ] 王绍武、赵宗慈, 中国近五百年夏季降水的重建, 地理学报, 4, 117—122, 1980.
- [ 6 ] Huang Jiayou and Wang shaowu, Investigations on variations of the subtropical high in the western Pacific during historic times, *Climatic Change*, 7, 427—440, 1985.
- [ 7 ] Wu Xiangding and J. M. Lough, Estimating North Pacific summer Sea level pressure back to 1600 using proxy climate records from China and North America, *Advance in Atmospheric Sciences*, 4, 74—84, 1987.
- [ 8 ] Zhang Xiangong et al., The Southern Oscillation reconstruction and drought/flood in China, *Acta Meteorological Sinica* 3, 3, 1988.
- [ 9 ] Glahn, H. R., Canonical correlation and its relationship to discriminant analysis and multiple regression, *J. A. S.*, 25, 23—31, 1968.
- [ 10 ] Wright, P. B., An Index of the Southern Oscillation, QURP4, Climatic Research Unit, Norwich, England, 22 pp., 1975.
- [ 11 ] 竺中桢, 中国近五千年来气候变迁的初步研究, 考古学报, 1, 1972.
- [ 12 ] Fritts, H. C., Spatial climatic reconstructions from tree—ring analysis. Academic Press, London, 1980.

## RECONSTRUCTIONS OF THE SOUTHERN OSCILLATION AND PACIFIC SEA SURFACE TEMPERATURE FOR THE LAST 500 YEARS

Song Jie      Zhang Xiangong

(Academy of Meteorological Science, SMA)

### Abstract

In this paper, a canonical correlation technique has been used to reconstruct the seasonal index of the Southern Oscillation and seasonal Pacific SST from the dryness/wetness in China for the last 500 years. About 40 percent of the SO variance during the calibration period of 1913—1973, and about 20 percent of the variance for an independent period of 1852—1912 have been calibrated and verified, respectively. In the reconstruction of the Pacific SST, about 60 percent SST variance has been calibrated in the equatorial eastern Pacific areas and the estimate value has been efficiently verified over 100 years. It shows that the past ENSO events can be reconstructed in certain extent by using dryness/wetness data in China. It is found that ENSO events not only has apparent periodicity, but also has about 250 years stage change. Both SO and SST have the well-known 2—7 year periodicities, besides, SO has 10.6 year period and SST has 25—28.5 and 100 year periods which relates with the solar activities. It is also found that the low SOI events are estimated to be less frequency during the 18th, 19th and the early 20th centuries than the later 15th, 16th, 17th and later 20th centuries, and that the frequent (rare) occurrence of the low SOI events mentioned above corresponds with the climatic cold (warm) period, and that the dryness (wetness) period in China is related to the cold (warm) East Pacific and warm (cold) West Pacific.