文章编号: 1000-2022(2003) 02-0243-09

20 世纪 70 年代前后北太平洋海温场气候特征的比较

高庆九¹, 屠其璞²

(南京气象学院 1. 气象灾害与环境变化重点开放实验室; 2. 资源环境与城乡规划系, 江苏 南京 210044)

摘 要:采用 1950—1998 年 588 付的 為表温度 SST (Sea Surface Temperature) 资料,应用 EOF、小波分析等方法,分析了北太平洋海温时空分布特征,指出 20世纪 70 年代中后期北太平洋海温有明显变化:赤道中东太平洋由冷转暖,中高纬西风漂流区 由暖转冷,且西风漂流区变化更为显著。厄尔尼诺和拉尼娜事件在此前后也呈现出不同的特征:1976 年前拉尼娜(1976 年后厄尔尼诺)事件持续时间长,强度大,事件发展 初期厄尔尼诺海区就表现为较强的负(正)距平。海温变化存在 2 ~6 a 的 ENSO 循环周期,并选加着 8 ~9 a 的 年际振荡和 22 a 左右的 年代际尺度的变化。另外,还有以 1981 年前 后为转折点的长期变化信号。

关键词: 北太平洋海温;自然正交分解; 厄尔尼诺; 拉尼娜; 年代际变化 中图分类号: P732 文献标识码: A

海洋是地球气候系统最重要的组成部分,海温作为气候变化的一个因子的重要性早被普 遍认识到,随着科学的发展和社会的需要,其年代际变化也成为人们关注的问题。许多观测事 实显示,北太平洋海温和大气环流都存在着年代际变化特征。Trenberth等^[1]的研究指出,大 约在 1976 年前后,北太平洋的海平面气压、大气环流、风暴轴存在着年代际变化,海温、风应力 以及热含量等也都存在着 10 a 尺度的变化特征;Graham^[2]从观测资料和模式模拟两方面进 行研究,指出在 20 世纪 70—80 年代间北太平洋海温、冬季大气环流以及风应力等多种要素均 发生显著的变化,El Nino 事件也有变化,并指出这种变化是由于平均气候背景场的改变,即 70 年代以来赤道中、东太平洋增暖,而西北太平洋冷却;北太平洋海温的这种年代际变化被称 为太平洋年代际涛动 PDO(Pacific Decadal Osillation);Wang^[3]指出,在海温背景场处于冷态 时有利于东太平洋 SST 异常西传,而暖态时有利于异常海温东传。徐建军等^[4]用子波分析方 法对太平洋地区的 SST 变化进行讨论,指出在 70 年代末变化是突然降温的,与热带海洋相 反。谭桂容等^[5]、杨永胜等^[6]的研究也指出海温变化对大气环流和降水等有重要的影响。因此, El Nino 和La Nina 现象作为全球气候变化中的强信号,它在海温的这种年代际背景场的状态 下有何不同为必须研究的内容。

作者简介: 高庆九(1969-), 女, 陕西渭南人, 讲师, 硕士生.

收稿日期: 2003-01-18; 改回日期: 2002-03-01

基金项目:科技部课题 "气候变暖对北方持续性干旱影响的研究"(97G1)

1 资料和方法

本文采用英国气象局整编的 1950 年 1 月—1998 年 12 月的全球逐月海表温度格点资料, 范围为 0 $^{\circ}$ 360 $^{\circ}$ 90 S \sim 90 N, $\Delta \lambda \times \Delta \Psi = 2 ^{\circ} \times 2 ^{\circ}$,从中截取范围在 121 E \sim 79 W, 9 S \sim 61 N 的海温资料, 网格距仍为 2 $^{\circ} \times 2 ^{\circ}$ 共 588 个月。

为了消除海温均值和方差的年变化影响,首先对上述资料做中心化处理,求得各月 49 a 平均值、各月的距平及相应的标准化距平资料。以 49 a 共 12 个月资料组成长度为 588 个月的 距平序列和标准化距平序列作为分析对象。采用经验正交函数 EOF(Empirical Orthogonal Function)分析^[7-8],合成分析和墨西哥帽小波变换^[9-0]及t 检验^[11]等分析方法。

2 北太平洋海温场时空分布特征

对 588 个月的海温标准化距平进行 EOF 分析(结果见表 1),并根据 North 等^[12]提出的计算特征值误差范围,对结果进行显著性检验,当相邻特征值满足: $\lambda_i - \lambda_{i+1} = e_i$, $e_i = \lambda_i (\frac{2}{n})^{\frac{1}{2}}$ 时,认为这两个特征值所对应的经验正交函数是有价值的信号,所以第 1、第 2、第 3 特征向量所对应的经验正交函数是有价值的信号。

衣 I LUF 分析结	釆
-------------	---

序号	特征值	累积特征值	方差贡献	累积方差贡献
1	324 835.125 00	324 835. 125 00	0.229 13	0.229 13
2	155 845.500 00	480 680. 625 00	0.109 93	0.339 06
3	99 158.507 81	579 839.125 00	0.069 94	0.409 01
4	98 016. 695 31	677 855.812 50	0.069 14	0.478 15
5	73 518.148 44	751 373.937 50	0.051 86	0.530 01

2.1 空间分布特征

北太平洋_{SSTA}的第1特征向量(图1a)代表了北太平洋海温距平的主要分布型。南北向 和东西向均存在反位相的海温分布:赤道中、东太平洋的椭圆形区域及北美加利福尼亚沿岸为 负值,北太平洋中纬度西风漂流区和黑潮区为正值,但绝对值赤道东太平洋海区远大于北太平 洋中纬地区。赤道中、东太平洋为冷(暖)水区时,北太平洋中纬度西风漂流区和赤道西太平洋 为暖(冷)水区,这是典型的 ENSO 循环海温异常空间分布型。

SSTA 的第2分布型(图1c),在5~20N 之间为一个略呈东北—西南走向的带状正值分 布区,其南北两侧为反号的距平带。25~40N 之间和赤道太平洋为同号海温距平区,但前者绝 对值远小于后者。

图 1e 是 SSTA 的第3分布型,它与前两个特征向量存在较大差异。北太平洋中部区域 (150 £~140 %,35~50 %)和(160 £~140 %,9 §~20 %)海温分布同号,其余海区反号。

2.2 时间系数特征

第1时间系数(图1b)呈现出较明显的年际和年代际变化特征。选定赤道东太平洋Nino1、Nino2、Nino3区,根据对海温距平场进行EOF分析所得到的第1时间序列和第1空间型,以SSTA达到或超过0.5,持续时间6个月为标准,可以看到其谷(峰)年与El Nino(La Nina)

年相对应:谷年1957、1963、1965、1969、1972、1976、1983、1987、1991、1993、1994、1997年为 El Nino 年和峰年1950、1955、1964、1968、1971、1973、1975、1984、1988年为 La Nina年,这与文献[13-14]基本一致;在年际变化上还迭加着年代际的变化,对时间序列作了5a滑动平均后, 很明显在20世纪70年代中后期,海温场存在转折,在此之前时间序列5a滑动平均基本为正,之后基本为负。



图 1 北太平洋海表温度标准化距平 EOF 分析前 3 个特征向量场(a,c,e)和时间系数(b,d,f) Fig. 1 The first 3 eigenvectors(a, c, e) and time coefficients(b,d,f) of

North Pacific Ocean's SSTA EOF

从第2时间系数及其5a滑动平均的时间序列(图1d)来看,年代际变化特征较明显,与 El Nino和La Nina 没有明显的对应关系。在70年代中后期第2时间系数开始反向转变,但转 折点较第1特征向量所对应的时间序列晚。

在第3时间系数(图1f)中可以看出:50年代到60年代中期,时间系数有上升趋势,60年 代中期之后到80年代中期有下降趋势,后又升高,到90年代下降。从5a滑动平均的序列来 看,时间系数在70年代较平稳,基本在零线附近,之前基本为正值,之后基本为负值。

从上述分析可见,在 20 世纪 70 年代中后期海温场发生了明显的变化,并结合其他学者 等^[1-2]的研究,以 1976年为界,对其前后的时间系数进行平均,比较其差异,结果如表 2。

由表 2 可以看出,前 3 个时间系数在 1976 年前后的平均值均反号,1976 年后的绝对值大于 1976 年前。对上述结果进行 t 检验, t1= 12.938, t2= 4.7, t3= 7.518,3 个时间系数均通过 α

= 0.001的显著性检验($t \approx 2.584$), 说明上述结果差异是显著的。

表 2 EOF 分析的前 3个时间系数在 1976 年前后的比较

Table 2 Comparison of the first 3 time coefficients before or after 1976

	第1时间系数	第2时间系数	第3时间系数
1976 前	10.420	- 2.919	3. 623
1976 后	- 11.779	3.299	- 4.095

特征向量场和时间系数在北太平洋中高纬海温 SSTA 的变化是一致的, 增暖或变冷的幅度较大, 赤道太平洋 3 个特征向量场是不同步变化的。因此, 1976 年后低纬赤道中东太平洋和副热带太平洋转暖, 暖水范围较大, 达到 30 N; 白令海转暖, 西风漂流区海明显变冷。

3 20 世纪 70 年代前后 El Nino 和 La Nina 过程的比较

3.1 频数和持续时间

根据文献[13-14]以及对海温距平进行 EOF 分析所得的第1时间系数,得到表3。可以看出,1976年之前厄尔尼诺发生6次,拉尼娜发生7次,拉尼娜现象的持续时间均超过10个月,平均17.6个月,而厄尔尼诺现象持续时间除一次为17个月外,其余均不超过10个月,平均9.5个月。1976年之后,拉尼娜现象发生次数(2次)远少于厄尔尼诺现象(6次)发生次数,厄尔尼诺不但发生次数较多且持续时间较长(平均14.2个月)。

	厄尔尼诺年			拉尼娜年	
起始年月	结束年月	持续时间/月	起始年月	结束年月	持续时间/月
1957-03	1958–07	17	1950-01	1951-03	15
1963-06	1963-12	7	1954-03	1956-08	30
1965-05	1966-01	9	1964-02	1965-01	12
1968–10	1969-05	8	1967-07	1968-04	10
1972-05	1973-01	9	1970-05	1972-01	21
1976-07	1977-01	7	1973-04	1974-06	15
1982-04	1983-08	17	1974-09	1976-04	20
1986-08	1988-01	18	1984-09	1985-05	9
1991-04	1992-08	17	1988-05	1989-03	11
1993-01	1994-01	13			
1994–10	1995-03	6			
1997-04	1998-05	14			

Table 3 Beginning, ending and duration of El Nino and La Nina

3.2 El Nino 和 La Nina 年过程中 3 个时间系数平均变程的比较

对 1976 年前后的厄尔尼诺年和拉尼娜年及其前 1 a 和后 1 a 共 36 个月的前 3 个特征场时间系数分别进行了合成(图 2),发现他们有明显的差别。

从图 2a 可以看出, 1976 年前厄尔尼诺事件发生平均持续时间较短, 最强阶段平均只有 2

~3个月,海温变化幅度比较大,而1976年后厄尔尼诺事件发生平均持续时间较长,最强阶段 持续时间近10个月。与表3中的结果是一致的。1976年后厄尔尼诺海区海温长时间地为正海 温距平,事件从正海温距平发展起来,但海温变化不是很剧烈。厄尔尼诺发展过程中海温距平 绝对值变化1976年前大于1976年后,但正海温距平的范围在1976年之后增大。





Fig. 2 The composite first time coefficients of El Nine(a) and La Nina(b)

从图 2b 可以看出, 拉尼娜事件在 1976 年前后发展特征与厄尔尼诺相反, 1976 年前拉尼 娜事件持续时间长, 最强阶段持续时间长(近 10 个月)强度大, 1976 年前厄尔尼诺海区海温长 时间为负海温距平, 事件从负海温距平发展起来。

从第2时间系数(图3)看,1976年前后厄尔尼诺过程形态上基本相似,但1976年前基本 为负值,从前1a年中开始变化,1976年后基本为正值,在当年年初开始,并且和第1时间系数 同步(都在当年8月达到最大)。而在1976年前后拉尼娜过程第2时间系数变化位相刚好相 反,之前基本为负,之后基本为正,海温开始变化都是在前1a的年末。反映在海温上,在厄尔 尼诺海区和西风漂流区,1976年前为正距平1976年后为负距平。



图 3 厄尔尼诺年(a) 和拉尼娜年(b) 第 2 时间系数合成

Fig. 3 The composite second time coefficients of El Nino(a) and La Nina(b)

在1976年前的厄尔尼诺和拉尼娜过程中,第3时间系数(图4)多为正值,1976后多为负值。反映在SSTA的变化上,在厄尔尼诺海区,1976年前为负SSTA,1976年后为正SSTA。从36个月的发展情况来看,在事件发展初期的差别较大,1976年前均是从负海温场发展起来的,1976年后均从正海温距平发展起来,末期基本相似。1976年前拉尼娜事件持续时间长强度大,1976年后厄尔尼诺事件持续时间长强度大。1976年之前海温变化的绝对值比1976年之后大,海温变化比较强。

从以上分析可以看出,北太平洋海温场在70年代中后期经历了一次转变,低纬赤道中东



图 4 厄尔尼诺年(a) 拉尼娜年(b) 第 3 时间系数合成

Fig. 4 The composite third time coefficients of El Nino(a) and La Nina(b)

太平洋由冷态转为暖态, 西风漂流区从暖态转为冷态。海温场的这种变化影响了 ENSO 循环 的两个位相: 厄尔尼诺和拉尼娜的发展进程使其在 1976 年前后的发展过程和持续时间上有明 显的不同, 而据 Wang^[3]研究, 在海温背景场处于冷态时有利于东太平洋 SST 异常西传, 暖态 时有利于异常东传, 事实上, 1951, 1957—1958, 1965, 1972 和 1976 年发生的厄尔尼诺事件, 1955—1956, 1961—1962, 1964, 1970—1971, 1973 和 1978 年的拉尼娜事件是从东向西传播 的, 1963, 1982—1983 和 1986—1987 年的厄尔尼诺事件, 1967, 1975 和 1978 年的拉尼娜事件 是从西向东传播的^[15]。

3.3 El Nino 和 La Nina 年平均海温距平特征

从 1976 年前后厄尔尼诺和拉尼娜年年平均海温距平分布图(图 5、图 6)上可以看到, 1976 年后, 厄尔尼诺年暖水范围扩大, 除赤道中、东太平洋外, 原为负海温距平的美国西海岸、白令 海均转为正海温距平区, 西风漂流区由正海温距平转为负海温距平, 海温变化幅度比较大。 而 拉尼娜年冷水范围缩小, 赤道中、东太平洋为负海温距平, 美国加利福尼亚沿岸、白令海由负海 温距平转为正海温距平, 西风漂流区的正海温距平转为负海温距平, 位置向北偏移。整个北太 平洋海温场在 1976 年后拉尼娜年呈现 '正负正负 '的海温距平分布。



图 5 1976年前厄尔尼诺年(a)和拉尼娜年(b)SSTA分布(等值线间隔为 0.1) Fig. 5 SSTA distributions of El Nino(a) and La Nina(b) before 1976 (interval: 0.1

从图 7 可以看出, 1976 年后海温增暖的中心位于日本海附近, 白令海, 阿拉斯加湾区和加利福尼亚沿岸, 而变冷的中心位于西风漂流区。并且在中纬度海温变化比低纬大(厄尔尼诺年中纬海温变化最大可达到 0.8 , 低纬为 0.6 , 拉尼娜年中纬海温变化最大可达到 1.2 , 低纬为 0.9)。



图 6 1976年后厄尔尼诺年(a) 和拉尼娜年(b) SST A 分布(等值线间隔为 0.1)

Fig. 6 SSTA distributions of El Nino(a) and La Nina(b) after 1976(interval: 0.1)



图 7 1976 年前后厄尔尼诺年(a)和拉尼娜年(b) SSTA 分布差异(等值线间隔为 0.2)

Fig. 7 Difference of the SSTA distributions of El Nino(a) and

La Nina(b) between the two periods(interval:0.2)

4 海温变化的周期振动特征

小波分析方法是近些年来发展起来的一种新的分析技术,可从频率域和时间域来分析时间序列的波谱振幅随时间的变化特征。小波变换不仅可以给出气候序列变化的尺度,还可以显现出变化的时间位置^[10,12],因此用墨西哥帽小波变换方法对 EOF 的第 1、2、3 时间系数进行分析,寻找其周期变化规律。所用小波函数如下

$$\Psi(x) = 0.867(1 - x^{2}) \exp(\frac{-x^{2}}{2}),$$

从第1时间系数的小波变换图(图 8a)可以看到,北太平洋海温场存在明显的年际变化和 年代际变化。其中年际变化主要是周期为2~6 a 的 ENSO 循环,但年际变化的周期在整个时 段内并不是一成不变的。从变换尺度小于32月的部分可清楚地看到,在1964年以前,4~6 a 的周期比较明显,小波变换系数的极值中心(绝对值大于50)逐步向大尺度方向偏移,即向长 周期方向变化。在1963—1978年之间,2~4 a 的周期明显。1982年以后,则为明显的4 a 左右 的周期。另外,在1960年以前和1967年以后,也有1个周期约为8~9 a 的振荡。年代际尺度 的变化主要表现为周期约为22 a 的振荡和1981年前后为转折点的长期变化信号。从图中可 以看到,最强的拉尼那年(1976年)和最强的厄尔尼诺年(1983)年在各个尺度上都是同位相 的,因此其持续时间长,海温异常幅度大。

根据墨西哥帽小波变换的性质,对某一尺度而言,变换系数为零的点所对应的时间有可能



图 8 海表温度标准化距平 EOF 分析第 1(a)、2(b)、3(c)时间系数小波变换 Fig. 8 Wavelet transform of the SSTA's EOF's first(a), second(b) and third(c) time coefficients(interval:50)

是该尺度变化的突变点。因此从图中可以看出各尺度变化突变点的位置,但只有一条零线从小 尺度贯穿到大尺度,那就是起始于尺度1的1976年,终止于尺度128的1981年的零等值线。 这就是1976年前后的海温突变。

从第 2 时间系数的小波变换图(图 8b)上看,主要有两个较明显的周期振荡,其中年际变 化为 1971 年以后的周期为 3 ~ 5 a 和 1961—1968 年周期约为 5 a 的振荡,年代际振荡是周期 约为 22 a 的振荡,并且这一年代际变化的周期有变长的趋势。另外,有 3 条小波变换系数的零 线贯穿所有尺度,这说明第 2 时间系数的变化幅度很大,以至于在各尺度上都有反映。

第 3 时间系数的小波变换图(图 8c)上可以看出,第 3 时间系数年代际变化明显,为 1976 年前后的突变,而年际变化较强的信号为 1982—1990年的周期为 2~3 a 的振荡和 1990年后 的周期约为 10 a 的振荡。

5 结 论

(1)在1976年前后,赤道中、东太平洋厄尔尼诺海区由冷转暖,暖水范围增大,中纬度西风 漂流区海温由暖转冷,两者为反位相分布,中纬度西风漂流区的海温变化较大。

(2)在 1976年前, 拉尼娜事件发生次数多, 事件初期从负海温距平开始发展, 持续时间长, 强度比较大; 1976年后, 厄尔尼诺事件发生次数和之前相当, 事件初期从正海温距平开始发展, 持续时间加长, 强度增大。

(3) 海温变化上不但存在 2~6 a 的 ENSO 循环周期, 还迭加着 8~9 a 的年际振荡和约为
 22 a 年代际尺度的变化。另外, 还有以 1981 年前后为转折点的长期变化信号。

中纬度西风漂流区与厄尔尼诺海区都是变化比较显著的海区,长期以来对低纬海洋研究 较多,从以上分析可以看出,西风漂流区的作用也很显著,海温不仅有年际变化特征,还存在显 著的年代际变化特征,在海温年代际变化的背景场上,海温的年际变化会更明显,从而影响到 大气环流以及降水等各个方面,因此对这些问题做进一步的探讨显得尤为重要。

参考文献:

- [1] Trenberth K E, Hurrell J W. Decadal atmosphere-ocean variation in the Pacific J]. Climate Dyn, 1994, 10(6): 303-319.
- [2] Graham N E. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observation and model result[J]. Climate Dyn, 1994, 10(3): 135–162.
- [3] Wang B. Interdecadal changes in El Nino onset in the last four decades[J]. J Climate, 1995, 8(2): 267-285.
- [4] 徐建军,朱乾根.印度洋—太平洋海温长期变化的周期性及其年代际变化[J].热带气象学报,1998,14(4):353-358.
- [5] 谭桂容, 孙照渤. 我国东部夏季降水型与北半球大气环流和北太平洋海温的关系[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(1): 1-7.
- [6] 杨永胜,施 能. 我国东部近百年夏季雨型的前期冬季大气环流及海温场特征[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(1): 55-61.
- [7] 屠其璞, 王俊德, 丁裕国, 等. 气象应用概率统计学[M]. 北京: 气象出版社, 1984: 445-470.
- [8] 施 能. 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 205-229.
- [9] 邓自旺, 尤卫红, 林振山. 子波变换在全球气候多时间尺度变化分析中的应用[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(4): 505-510.
- [10] 刘太中, 郑祖光. 气候突变的子波分析[J]. 地球物理学报, 1995, 38(2): 158-162.
- [11] 马开玉,陈 星,张耀存. 气候诊断[M]. 北京: 气象出版社, 1996: 143-176.
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 114-122; 106-112.
- [13] ENSO 监测小组. 厄尔尼诺事件的划分标准和指数[J]. 气象, 1989, 15(3): 37-38.
- [14] 陈兴跃, 王会军, 曾庆存. 大气季节内振荡及其年际变化[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 92-95.
- [15] 林学椿, 于淑秋. 厄尔尼诺与我国汛期降水[J]. 气象学报, 1993, 51(4): 434-441.

Comparison of the Climatic Characters of North Pacific SST between for- and aft-1970s

GAO Qing-jiu¹, TU Qi-pu²

(1. Key Laboratory of Meteorlogical Disaster and Environmental Variation;
2. Department of Geography, NIM, Nanjing 210044, China)

Abstract: EOF, wavelet analysis, composite analysis and *t*-test are used to investigate the SST of 1950—1998(588 months), and describe spatial and temporal characters of the SST. It is found that there is an apparent transition during middle and later 1970s: eastern and middle Equatorial Pacific SST turns higher, and mid-latitude Pacific SST turns lower, even more distinctly in west wind drift zone. It is also found that the duration of El Nino (La Nina) is longer with greater intensity after(before) 1976 than before(after) the time, La Nina zone has positive(negative) SSTA in the early stage; the course of SST has an ENSO cycle of $2 \sim 6$ years with annual oscillation of $8 \sim 9$ years, a interdecadal variation scale of about 22 years and a signal for long term change, the turn being in 1981.

Key words: SST of North Pacific; EOF; El Nino; La Nina; interdecadal variation