

全球海表温度场中主要的年代际突变及其模态

肖栋^{1,2} 李建平²

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 用滑动 t 检验法对 NOAA 提供的改进扩展重建的全球海表温度场 (1867~2005 年) 的年平均时间序列进行了年代际突变的定量检验。给出了几个年代际突变时期的时空分布, 这些时期有: 1894~1901 年、1905~1909 年、1920~1930 年、1939~1945 年、1954~1958 年、1973~1979 年和 1994~1998 年, 并确定了全球海表温度年代际突变的时间, 不仅发现了大家熟知的 1924、1942 和 1976 年左右的突变, 还发现了 1894、1907、1956 年和最近的 1997 年的突变。分析表明, 赤道太平洋和南太平洋是海温变化的敏感区的可能性较大, 其次是北太平洋和南印度洋。用合成差分析得到了全球海表温度场的年代际模态的空间分布, 1895~1906 年和 1908~1923 年、1925~1941 年和 1943~1955 年以及 1977~1996 年和 1998~2005 年这三对模态分别在大部分海域大体上存在较为明显的反位相结构, 太平洋上各个时期均表现为 PDO 模态, 只是强度和范围有所不同, 大西洋的南北结构具有不对称性, 增暖占主导地位。用滑动 t 检验法对 PDO 的年代际突变的信号进行了定量的检验, 发现其年代际突变的时间依次为: 1908、1924、1942、1956、1976 和 1997 年, 除了 1894 年的突变外, 其余突变年份与上述全球海表温度场的年代际突变时间基本上是一致的, 这说明 PDO 是全球海表温度场年代际突变的重要成员之一。假如存在 1997 年左右的突变, 1998~至今时段就是全球海表温度场一个新的年代际背景, 就其年代际模态而言, 目前的强度比 1943~1955 时段的年代际背景还要强; 就 PDO 目前的强度来说, 与 1909~1923 和 1957~1975 这两个时段的强度大体相当。

关键词 全球海表温度 滑动 t 检验法 年代际突变 年代际模态 太平洋年代际振荡

文章编号 1006-9895 (2007) 05-0839-16 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Main Decadal Abrupt Changes and Decadal Modes in Global Sea Surface Temperature Field

XIAO Dong^{1,2} and LI Jian-Ping²

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A moving t -test technique (MTT) is developed for quantitatively detecting the decadal abrupt changes (DACs) in the annual mean time series of Global Sea Surface Temperature (GSST) field for 139 years (1867-2005). The data used in this paper are Extended Reconstruction Sea Surface Temperature (ERSST) from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). A correction to the effective degrees of freedom of t -test is adopted for the dependency of time series of SST to be examined. This study focuses on abrupt change of mean value at decadal timescales. The spatial distribution of the DACs of GSST are shown in several epochs as follows: 1894-1901, 1905-1909, 1920-1930, 1939-1945, 1954-1958, 1973-1979 and 1994-1998. The DACs of the Pacific

收稿日期 2006-04-27, 2006-08-01 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400503, 优秀国家重点实验室研究项目 40523001

作者简介 肖栋, 男, 1981 年出生, 在读博士, 主要从事年代际突变的研究。E-mail: xiaodong@mail.iap.ac.cn

Ocean took on PDO-like modes through all the epochs. The authors confirmed the decadal abrupt change years (DACs) of GSST with the time coefficient of the second mode of GSST field. Our results show that the well-known 1924, 1942 and 1976 DACs of GSST are not unique, also found around 1894, 1907, 1956 and the recent 1997 DACs. The equatorial Pacific Ocean and the South Pacific Ocean are likely to be the most sensitive area to the DACs of GSST. The next ones are the North Pacific Ocean, the South Indian Ocean and the North Atlantic Ocean. The third one is the South Atlantic Ocean. Decadal modes (DMs) in the GSST field are got from epoch differences of the averaged field between the episodes 1895-1906 and 1893-1880, 1908-1923 and 1895-1906, 1925-1941 and 1908-1923, 1943-1955 and 1925-1941, 1957-1975 and 1943-1955, 1977-1996 and 1957-1975, 1998-2005 and 1977-1996. They take on Pacific decadal oscillation (PDO) modes in the Pacific at all the epochs with only differences in intension and position. The meridional structure of the DMs in the Atlantic Ocean is dissymmetrical, warm trend is dominant. The opposite phases of DMs in GSST field occurred between DMs 1895-1906 minus 1880-1893 and 1908-1923 minus 1895-1906, 1925-1941 minus 1908-1923 and 1943-1955 minus 1925-1941, 1977-1996 minus 1957-1975 and 1998-2005 minus 1977-1996 in most areas. The PDO index (November-March) computed with the NOAA ERSST is detected by MTT. The DACs of the PDO are 1908, 1924, 1942, 1956, 1976 and 1997. The DACs 1908, 1956 and 1997 are first found. They are the same as the DACs of the GSST in essence except 1894. It indicates that the PDO takes an important part in DACs of GSST. If the 1997 DAC exists, the epoch 1998 up to the present is a new decadal background in the GSST field. The present intension of the DM in GSST field is stronger than that in the epoch 1943-1955; and the PDO, might be similar to that in the epochs 1909-1923 and 1957-1975.

Key words global sea surface temperature (GSST), moving t -test technique (MTT), decadal abrupt change (DAC), decadal mode (DM), Pacific decadal oscillation (PDO)

1 引言

20 世纪 90 年代后, 年代际尺度的气候变率问题引起了国际气候界的高度关注。在国际上也开展了气候变率和可预报性计划 (CLIVAR) 的研究。究其原因, 其一, 20 世纪 70 年代中后期北太平洋出现了一次显著的年代际变化^[1~21], 随后的研究揭示了这一突变在气候系统各成员中的反映、对生态系统的影响及其可能机制^[1~5, 7, 8, 10, 12~14, 20, 21]。其二, 年代际是具有重要承上启下作用的时间尺度。一方面, 它作为年际尺度的背景, 可能对年际尺度的气候变率现象 (如 ENSO) 具有重要的影响^[11, 12, 14, 20]; 另一方面, 对于世纪尺度的全球变暖, 它又是一种极为重要的扰动。

海表温度 (SST) 年代际变化的研究最初集中在北太平洋地区。1976/1977 年北太平洋地区海气系统发生了一次年代际尺度的跃变, Quinn 和 Neal^[1, 2]最早揭示了这一现象, 随后, Nitta 等^[3]、Trenberth^[4]、Ebbesmeyer 等^[5]、Trenberth 等^[10]和 Graham^[7]进一步指出北太平洋地区的 SST 和大气环流发生了十分明显的年代际变化。Zhang 等^[14]指出全球海表温度时间尺度超过 6 年以上的

低频变化第一模态的主要特征是 1976 ~ 1992 东太平洋变暖、北太平洋变冷。Mantua 等^[12, 20]提出太平洋的年代际振荡模态 (PDO), 并确定其年代际突变的时间为 1890、1925、1947 和 1976 年。White 等^[15]和 Garreaud 等^[17]发现 PDO 在南北半球是一个对称的结构。Gille^[19]指出近 50 年印度洋的 SST 一直是变暖的。对于北大西洋区域, Kushnir 等^[9]使用综合海洋大气资料 (COADS) 得到了北大西洋暖异常时期 (1950 ~ 1964) 和冷异常时期 (1970 ~ 1984) 的 SST 差异; 对 SST、风场及大气环流的变化进行了分析, 显示出在北大西洋区域上, 十年和更长时间尺度耦合变化是一致的。

这些工作都是各个大洋年代际突变的一些定性的研究, 并没有对全球海表温度 (简称 GSST) 的年代际突变时间进行定量的检验和判断。如果对年代际突变点进行定量地检验和判断, 就可以得到空间场上不同区域的突变时间, 从而可以了解年代际突变的空间分布特征及其最早的响应时间和响应区域。这对于我们了解年代际突变开始的时间和地点有一定的帮助, 对于年代际突变的预报也有一定的指示意义。也可以知道年代际突变前后不同年代际背景下 GSST 模态的空间分布和显著变化区域, 这

对于我们了解 GSST 年代际背景的差异也是有帮助的。目前, 均值突变的研究较多, 本文研究的也是这些问题中的年代际均值突变的情况。

符淙斌等^[22]介绍了均值突变的概念。李建平等^[23]给出了一个完备的气候突变的定义及其数学提法, 并且指出气候突变的概念除了要针对气候的时空尺度, 还要考虑何种统计量和何种维持时间。年代际变率按照其变化形式, 可以分为周期变化, 渐变和突变; 依照其时间尺度大致可分为三类^[24, 25]: 十年/年代 (Decadal)、年代际 (Interdecadal) 和多年代际 (Multidecadal)。目前对于年代际的时间尺度没有统一的定义, 通常认为年代尺度为^[24] 8~13 年, 在周期变化上至少存在 15~35 年和 50~70 年的周期, 他们分别属于年代际和多年代际尺度。本文主要讨论十年尺度的年代际突变, 要考察的统计量是均值。用滑动 t 检验方法检测得到的突变的维持时间可能存在多种时间尺度, 为了统一期间, 我们将其通称为年代际均值突变 (Decadal abrupt change of mean value) (简称年代际突变或突变)。

2 资料和方法

2.1 资料

本文的资料来源于 NOAA 提供的由 Smith 和 Reynolds^[26]改进的扩展重建的全球海表温度场, 分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 。由于 1880 年以前的测站比较稀少^[26], 故本文只分析 1880 年至今年平均的年代际突变。本文用滑动 t 检验法 (描述见下文) 对 SST 场进行检验, 对年代际突变考察的时间尺度为 13 年, 故研究时段取为 1867~2005 年, 并用右边界值对资料的右端进行延拓, 延拓的长度为 13 年, 这样就可以得到 1880~2005 年所有年份的突变分布。

2.2 方法

符淙斌等^[22]和李建平等^[27]介绍并评述了检验均值突变常用的几种方法: 低通滤波法、滑动 t 检验法 (Moving t -test technique, MTT)、Yamamoto 法、Cramer 法、Mann-Kendall 法和子波变换等。李建平等^[27, 28]还发展了一种检验突变的新方法——连续滑动 t 检验法, 它可以确定出同一状态的同时段, 能确定出各气候阶段的性质间的关系, 但是突变点的确定需要人为比对。低通滤波法不能确定突变在那一年发生, 缺乏客观性^[23, 27],

Yamamoto 法和 Mann-Kendall 法只能用于检验较短时间序列中一次突变^[22, 29, 30]。李建平等^[31]从理论上证明形如阶梯函数确定存在一次突变的序列, Mann-Kendall 法是不能将突变点检验出来的。Cramer 方法中基准状态的选择人为性较强, 当气候从一个状态跳跃到和基准态相似的状态时, 突变就不能被检测出来。子波变换方法能准确地分析不同尺度的气候变化, 特别是能够定出气候突变点的位置, 是气候变化的有力工具。但是子波变换也有不足之处, 子波变换系数对某一时间尺度的过零点的位置是对应于该时间尺度下的可能的气候突变点, 因为过零点只是突变点的必要条件而非充分条件^[32], 而且目前还不能较为简便地将其应用于多维场。江剑民等^[33, 34]将 t 检验应用于子波变换中, 发展了一种可以检验突变临界值的扫描式 t 检验方法。MTT 用于检验单一时间尺度上的多次突变现象^[35, 36], 一些作者^[22, 37]认为其时间尺度的选择带有人为性, 可能会使得突变点产生漂移, 但是, 我们认为 MTT 检验得到的状态的维持时间是大于等于或者略小于 MTT 所考察的时间尺度, 对于维持时间小于 MTT 考察的时间尺度较多的状态, 就不属于这种时间尺度所检验的范围了, 而非时间尺度的人为选择造成的突变点漂移。所以, MTT 所考察的时间尺度就是我们所关心的年代际突变的时间尺度的近似下限 (可以略小于)。

滑动 t 检验法, 它是用来检验两随机样本平均值的显著性差异^[24, 35~37]。为此, 我们把一个长度为 n 的连续随机变量 x 分成两个样本子集 x_1 和 x_2 , 让 μ_i 、 S_i^2 和 n_i 分别代表 x_i 的平均值、样本方差和样本长度 ($i=1, 2$)。两样本子集始终间隔一个样本, 这样检验的就是某一年后 m_2 年和前 m_1 年均值的显著性差异。

原假设 $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ 。定义 t 统计量为:

$$t_0 = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{S_P \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^{\frac{1}{2}}},$$

这里, S_P 是联合样本方差,

$$S_P^2 = \frac{(m_1 - 1) S_1^2 + (m_2 - 1) S_2^2}{m_1 + m_2 - 2}$$

为 t 的无偏估计 ($E[S_P^2] = S^2$), 显然 $t_0 \sim t(m_1 + m_2 - 2)$ 分布, 给定信度, 得到临界值 t , 计算 t_0 后在 H_0 下比较 t_0 与 t , 当 $|t_0| > t$ 时, 否定原假

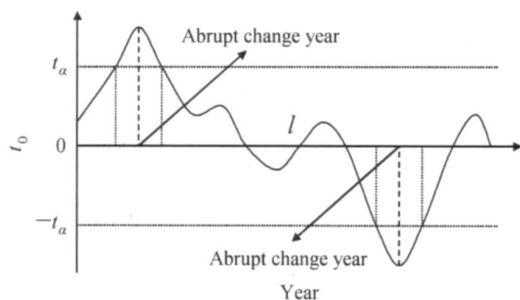


图 1 滑动 t 统计量年代际突变示意图。曲线 l 为统计量 t_0 的序列, t 是信度为 α 的临界值

Fig. 1 A demonstration of decadal abrupt changes of moving t -test statistical quantity. The curve l is the series of statistic quantity t_0 , t is the threshold at confidence level

设 H_0 , 即说明其存在显著性差异。当 $|t_0| < t$ 时, 则接受原假设 H_0 。

用 MTT 来检验某一个时间序列, 可以得到相应的 t_0 统计量序列, 如图 1 所示, 在 $|t_0| > t$ 的年份中, 峰值和谷值所对应的年份称之为突变年份 (Abrupt change year)、突变点 (Abrupt change point) 或者过渡年份 (Transition year) (见图 1), 其意义是指这一年前后两个均值状态的差异最大。根据本文所讨论的年代际突变, 取 $n_1 = n_2 = 13$ 。

对于独立、正态分布的时间序列而言, 上述 t 检验的自由度在常用数理统计表中都采用简化形式,

$$f(n) = n_1 + n_2 - 2$$

对于海温这类持续性较好的时间序列, 上式估计出的自由度通常偏大, 需要对其自由度进行必要的订正。本文采用较为简便的方法, 利用该序列的自相关系数 $r(\cdot)$ 来估算 t 检验的有效自由度 $E_f^{[33, 38]}$:

$$E_f(n) = f(n) \left[\sum_{k=0}^K r^2(k) \right]^{-1},$$

其中自相关系数的最大阶数 K , 在实际计算时通常取到 $r^2(k)$ 接近 0 值的阶数。

Mantua 等^[12, 20]用 Hadley 中心的 SST (1899 ~ 1981 年) 与最优插值的 SST (1982 年至今) 资料定义了太平洋年代际涛动 (PDO) 的指数, 为了便于比较, 运用本文资料, 计算了他们采用的 PDO 指数 (11 月 ~ 次年 3 月), 从 1880 年到 2004 年。

3 年平均 GSST 的年代际突变和年代际模态

3.1 各个时期年代际突变的时空分布

本文对 GSST 场的年平均时间序列进行滑动 t

检验, 把同一突变时期 (见下文) 内所有年份的突变区域 (同一突变时期内不会重合) 叠加在一起, 就可以看到该时期突变的时空分布图 (图 2)。图 2 中, 绿蓝色系代表的是降温突变, 黄红色系代表的是升温突变。本文主要讨论较大范围的突变, 对于突变范围很小的区域, 本文就不再赘述了。图 2g 中 90 年代的突变都是其以后的时段 (不包括延拓的年份) 与其前一时段均值检验显著的区域, 突变以后的维持时间为 7 ~ 11 年 (即 1999 ~ 2005 和 1995 ~ 2005), 基本上达到了年代尺度, 因此, 这一时段的突变还是有一定可信度的。在下文的叙述中, 我们都假定这样的统计是有效的。

为了避免引起理解上的偏差, 我们先明确突变时期的概念, 突变时期 (即突变过程) 不是指某一点 (区域) 突变的过渡时间, 而是空间场上的一次突变经历的时间, 是指全球场上某一区域发生突变, 然后突变区域在空间场上不断扩大直至突变结束的这一时段。时间上很接近的两个突变时期的划分主要的依据是: 空间场上某一区域再次发生突变, 如 1894 年和 1907 年赤道东太平洋地区的突变, 以下同此例。1920 ~ 1930 这一时期的突变显示出较明显的空间差异性, 虽然整个突变时期的时间较长, 但是每个区域的突变经历的时间并不长, 而且每一点的变化都具有突然性。这一突变时期在空间场上的分布大致为: 1920 ~ 1925 年主要在北太平洋和印度洋西部, 1925 ~ 1930 年主要发生在大西洋的中部、北部和赤道东、西太平洋的部分海域 (见图 2c)。

3.1.1 1894 ~ 1901 年

这一突变时期以降温突变为主, 降温的突变主要发生在太平洋的西海岸、南印度洋和大西洋的北部及中部, 升温突变主要在赤道中、东太平洋和南太平洋 (见图 2a)。这一时期最早的升温突变于 1894 年发生在赤道中、东太平洋 (20°S ~ 16°N, 100°W ~ 154°W) 和南太平洋南部, 1895 年突变发生在南太平洋靠近极地海域 (前者南太平洋突变的南面)。这一时期最早的降温突变于 1894 年发生在北太平洋中部、南太平洋西部和南大西洋地区, 北大西洋的戴维斯海峡于 1895 年也较早地发生了降温突变, 这些突变区域在空间场上范围不断扩大的过程为:

1894 年发生在北太平洋中部 (38°N ~ 48°N,

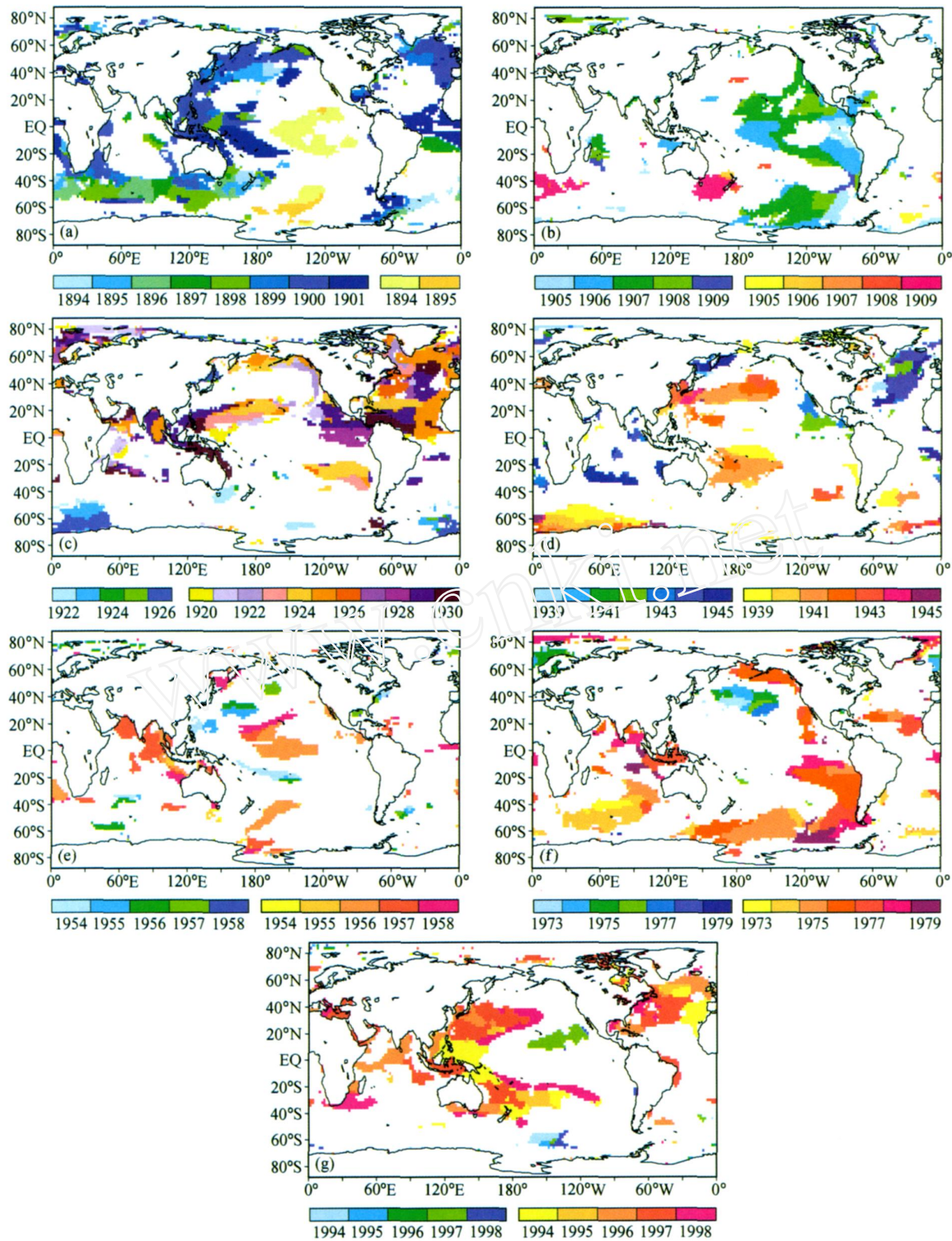


图2 各时段 GSST 年代际突变的空间分布：(a) 1894~1901 年；(b) 1905~1909 年；(c) 1920~1930 年；(d) 1939~1945 年；(e) 1954~1958 年；(f) 1973~1979 年；(g) 1994~1998 年。置信度均为 95 %；绿蓝色系代表降温突变，黄红色系代表升温突变
Fig.2 Spatial distributions of GSST (global sea surface temperature) abrupt changes during (a) 1894-1901 , (b) 1905-1909 , (c) 1920-1930 , (d) 1939-1945 , (d) 1954-1958 , (e) 1973-1979 and (f) 1994-1998. Color shadings exceed the 95 % confidence level. The green-blue color bars witness the cooling decadal abrupt climate changes and the yellow-red ones for the warming ones

166°W ~ 176°W) 的降温突变, 其附近的降温突变区域依次如下: 1895 年在前者西面, 1898 年在阿拉斯加湾北部的小范围海域和赤道西太平洋, 1899 年在日本附近海域, 1900 年在北太平洋北部和西太平洋, 1901 年在澳大利亚东北海域、赤道西太平洋和北太平洋东南部。

1894 年在南太平洋西部 (32°S ~ 42°S, 160°E ~ 180°E) 发生了降温突变, 其附近的降温突变区域如下: 1895 在其东南面, 1896 年在前者的西面和南印度洋中部, 1897 年南印度洋的东部 (1896 年印度洋突变的东面), 1898 年在前者的东面 (澳大利亚的南面靠近极地海域), 1899 和 1900 年在澳大利亚南面的临近海域和西面的小范围海域。

1894 年在南大西洋 (50°S ~ 60°S, 20°W ~ 52°W) 和好望角西南方的小范围海域发生了降温突变, 其附近的降温突变区域依次为: 1895 和 1896 年在好望角的西南面, 1897 年在好望角的东南方的小范围海域, 1898 年在前者的南面, 与印度洋中部的突变 (1896 年) 相接, 1899 年在前者的东北方的小范围海域, 1900 年在非洲南部的西面与东面, 1900 ~ 1902 年在 1898 年的突变的东南面。此外, 1896、1899 和 1901 年在 1894 年突变区域西面的德雷克海峡发生降温突变。

1895 年在北大西洋的戴维斯海峡发生降温突变, 其附近的降温突变区域如下: 1899 年在北大西洋的中部 (前者的东南方)、1900 年在前者的北面 and 东面、1901 年在赤道大西洋地区。此外, 1897 年在巴西以东海域 (6°S ~ 18°S, 10°W ~ 34°W) 也有降温突变, 但其在空间场上较孤立, 直到 1901 年才在其北面发生突变 (如上所述)。

3. 1. 2 1905 ~ 1909 年

这一时期以降温为主, 主要表现为太平洋的类 ENSO 模态的分布和南太平洋南部的降温突变 (图 2b)。这一时期最主要的升温突变于 1909 年发生在南大西洋东部和澳大利亚东南部, 但是它并没有在空间场上扩展开来。最早的降温突变于 1905 年发生在赤道东太平洋 (12°S ~ 6°N, 82°W ~ 98°W) 和南太平洋东部 (44°S ~ 68°S, 84°W ~ 100°W), 这些突变区域在空间场上扩展的过程为:

1905 年发生在赤道东太平洋的降温突变, 其附近的降温突变区域依次如下: 1906 年在赤道中太平洋 (16°S ~ 6°N, 150°W ~ 180°W)、赤道东太

洋南面和东北方, 1907 年在 1906 年赤道中太平洋突变的东面和北面, 1908 年在 1905 和 1906 年赤道东太平洋地区突变的西北方。

1905 年发生在南太平洋东部的降温突变, 其附近的降温突变区域如下: 1906 年在玛丽伯德地 (Marie Byrd Land) 以北的临近海域 (前者西南方), 1907 年在南太平洋靠近极地海域 (前者的北面), 1908 年在 1905 年突变的西面, 1909 年在 1905 年突变的北面。

3. 1. 3 1920 ~ 1930 年

如图 2c 所示, 这一时期以升温突变为主, 降温突变范围较小。升温突变主要发生在赤道以北的大西洋, 印度洋, 太平洋东岸和赤道太平洋。本次突变过程的区域性比较明显, 各海域的突变范围在空间场上扩展的过程为:

这一时期最早的升温突变于 1920 年发生在赤道西太平洋 (2°S ~ 8°N, 138°E ~ 152°E) 和印度洋的小范围海域, 太平洋海域的升温突变区域如下: 1921 ~ 1925 年在赤道中太平洋北部和北太平洋的北部及东部, 1923 和 1924 年在南美洲中部以西海域。1920 ~ 1925 年在西印度洋也发生了升温突变, 此外 1925 年还在孟加拉湾东部发生了升温突变, 1929 年在前者周围及东部, 1930 年在菲律宾以东海域和澳大利亚的北面及东北方海域。

1921 年在俄罗斯西部以北的巴伦支海发生了降温突变, 但这一信号相对孤立, 1922 和 1923 年在戴维斯海峡至纽芬兰岛一带发生了升温突变, 1925 年在北大西洋北部 (56°N ~ 66°N, 8°W ~ 54°W), 1927 年和 1929 年在挪威海都发生了升温突变。1924 年在墨西哥湾以西海域 (34°N ~ 82°N, 22°W ~ 32°W), 其后突变区域依次为: 1925 年在前者东面, 1926 年在 1924 年突变的北面, 1927 年在前者东面的小范围海域, 1929 和 1930 年在前者的东面。此外, 1928 年在赤道东太平洋 (6°S ~ 8°N, 78°W ~ 124°W) 也发生了升温突变, 1929 年在其北部和古巴以东海域, 1930 年在前者两个突变区域之间发生了升温突变。

降温突变发生在南大西洋、好望角以南靠近极地的海域和南、北太平洋的零星区域。降温突变 1922 年出现在澳大利亚东南面和南太平洋的小范围海域, 1923 年在好望角以南和南大西洋发生了降温突变, 1926 年在两者之间也发生了降温突变。

1926 年在日本以北海域也发生了降温突变。

3. 1. 4 1939~1945 年

如图 2d 所示, 这一时期的突变以太平洋的类 PDO 模态 (南、北太平洋升温, 赤道东太平洋降温) 的突变, 北大西洋和印度洋中部的降温突变为主要特征。这一时期最早的升温突变于 1939 年出现在南太平洋、南印度洋、南大西洋、白令海峡、加拿大北部群岛和智利北部以西海域, 1939 年在北大西洋发生了降温突变, 这些突变区域在空间场上扩展的过程为:

1939 年在南太平洋 ($4^{\circ}\text{S} \sim 14^{\circ}\text{S}$, $170^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{W}$) 发生了升温突变, 1940 年突变范围很小, 1941 年在南太平洋 (1939 年突变区域的南面), 1942 年在前者的包围之中发生了升温突变。1939 年在南印度洋南部发生了升温突变, 1940 年在其南部也发生了升温突变。1939 年在南大西洋, 1941 年在其西面都发生了升温突变。

北太平洋的升温突变区域依次如下: 1941 年在北太平洋 ($24^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{E} \sim 178^{\circ}\text{W}$), 1942 年在前者的南部和西部, 1943 年在北太平洋中部 (前者第二个突变区域的北面) 和中国东海岸, 1944 年在日本东南海域。北太平洋的降温突变区域依次如下: 1942 年在赤道以北的东太平洋 ($4^{\circ}\text{N} \sim 18^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{W} \sim 122^{\circ}\text{W}$), 1943 年在前者的北面, 1945 年在堪察加半岛 (Kamchatka Peninsula) 附近。

大西洋的降温突变区域依次如下: 1939 年在北大西洋 ($32^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{W} \sim 60^{\circ}\text{W}$), 1942 年在其东北方, 1943 年突变范围很小, 1944 年在 1942 年突变区域的南面和北面, 1945 年在 1942 年突变的东面和 1944 年第一个突变区域的西南面发生了降温突变, 此外, 1942~1945 年在南大西洋的东部也有零星突变。

1943 和 1944 年在北印度洋有零星的降温突变发生, 1945 年在印度洋中部和澳大利亚西部附近海域发生了降温突变。

3. 1. 5 1954~1958 年

如图 2e 所示, 这一时期的突变主要表现为太平洋较弱的类 PDO 模态 (南北太平洋降温, 赤道东太平洋升温) 的突变分布和印度洋低纬地区的升温突变。1954 年降温突变最早出现在南太平洋和赤道西太平洋, 1956 年较早的升温突变出现在印

度洋、赤道中太平洋和南太平洋南部, 这些突变区域在空间场上扩展的过程为:

南、北太平洋和西太平洋的降温突变区域为: 1954 年在南太平洋, 1956 年在其南面的小范围海域, 1954 年在赤道西太平洋, 1955 年在其东面和东北方, 1956 年在前者第二个突变区域的北面的小范围海域和 1957 年在北太平洋中部。

1956 年在印度洋东部发生了升温突变, 1957 年在前者西面的阿拉伯海和孟加拉湾发生升温突变, 1958 年在澳大利亚西北方发生了升温突变。

1956 年在赤道中太平洋 ($6^{\circ}\text{S} \sim 14^{\circ}\text{N}$, $178^{\circ}\text{W} \sim 126^{\circ}\text{W}$) 发生了升温突变, 1957 年在其西面, 1958 年在 1956 年突变区域的西北方发生升温突变。1956 年在南太平洋发生升温突变, 1957 年在其南部靠近极地地区也发生了降温突变。1956 年还在好望角以西海域发生了升温突变。

3. 1. 6 1973~1979 年

如图 2f 所示, 这一时期的突变主要表现为印度洋的升温突变、北大西洋北部的降温突变和太平洋的类 PDO 分布型 (北太平洋降温, 赤道太平洋升温) 突变。这一时期最早的升温突变 1973 年发生在南印度洋中部, 同年最早的降温突变发生在北太平洋中部, 1974 年南太平洋和北大西洋北部也较早地发生了升温突变, 这些突变区域在空间场上扩展的过程为:

这一时期最早的升温突变于 1973 年发生在南印度洋中部 ($36^{\circ}\text{S} \sim 44^{\circ}\text{S}$, $76^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$), 其附近的升温突变区域依次如下: 1974 年在中南印度洋 (前者南部), 1975 年印度洋东部 (前者东北部), 1976 和 1977 年在前者的南部的零星区域, 1976 年还在孟加拉湾和阿拉伯海的北部的零星区域, 1977 年在印度尼西亚南海域, 1978 年在孟加拉湾南部和 1979 年印度尼西亚的东南和东北海域。

最早的降温突变于 1973 年出现在北太平洋中部 ($30^{\circ}\text{N} \sim 38^{\circ}\text{N}$, $164^{\circ}\text{E} \sim 170^{\circ}\text{W}$), 其附近的降温突变区域依次如下: 1974 年在其北面, 1975 年在其西北方和东北方, 1976 和 1977 年在其东南方。1976 年还在北太平洋东北部和北美洲西海岸发生了升温突变。

1974 年在南太平洋南部出现了小范围的升温突变, 1975 年在南太平洋靠近极地附近 ($42^{\circ}\text{S} \sim 66^{\circ}\text{S}$, $130^{\circ}\text{W} \sim 180^{\circ}\text{W}$) 和 1976 年在前者的西面发

生升温突变。1975 年还在秘鲁以西海域 ($10^{\circ}\text{S} \sim 16^{\circ}\text{S}$, $80^{\circ}\text{W} \sim 100^{\circ}\text{W}$) 发生了升温突变, 其附近的升温突变区域依次如下: 1976 年在其南面和西面, 1977 年在前者南面靠近南美洲南端海域, 1978 年在德雷克海峡以西的小范围海域 (前者的东南面) 和赤道东太平洋 (1976 年突变的北面), 1979 年在 1977 年突变的西南方。

在大西洋, 1974 年在英国以北海域 ($60^{\circ}\text{N} \sim 72^{\circ}\text{N}$, $10^{\circ}\text{W} \sim 6^{\circ}\text{E}$), 1975 年挪威海 (前者东北方) 发生降温突变。1978 年在格陵兰岛至新地岛以北一线 (1974 和 1975 年突变区域的北面) 发生了升温突变。1975 年在赤道大西洋以北发生升温突变, 1976 年在其西面, 1977 年在其东面也发生了升温突变, 南大西洋也有零星的升温突变。

3.1.7 1994~1998 年

如图 2g 所示, 这一时期突变的主要特征是西太平洋和南、北太平洋, 北大西洋和印度洋一些海域的升温突变, 还有太平洋低纬的降温突变。1997 年较大范围的降温突变发生在赤道东太平洋北部 ($8^{\circ}\text{N} \sim 28^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\text{E} \sim 166^{\circ}\text{W}$)。这一时期最早的升温突变于 1994 年同时出现在西、南太平洋和北大西洋, 这些的突变区域在空间场上扩展的过程如下:

1994 年在西太平洋 ($0^{\circ} \sim 16^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$) 发生了降温突变, 其附近的升温突变区域依次如下: 1995 年在其东北方的小范围海域, 1996 年在中国南海 (1994 年突变的西面)、印度洋西北部和日本东南海域, 1997 年在中国东南、日本东南和印度尼西亚附近海域, 1998 年在西太平洋至北太平洋一线。

1994 年在南太平洋 ($24^{\circ}\text{S} \sim 36^{\circ}\text{S}$, $136^{\circ}\text{W} \sim 150^{\circ}\text{W}$) 发生了升温突变, 其附近的升温突变区域依次如下: 1995 年在其东面, 1996 年在澳大利亚南面和东南方的小范围海域, 1997 年在澳大利亚东面, 1998 年在澳大利亚东南方和南太平洋大致 20°S 一线海域。

1994 年北大西洋东部 ($20^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $10^{\circ}\text{W} \sim 40^{\circ}\text{W}$) 发生了升温突变, 其附近的升温突变区域依次如下: 1995 年在格陵兰岛以南 (前者西北方), 1996 年在前者东北方, 1997 年在北大西洋中部 (1994 年突变的西面), 1998 年在美国东海岸附近 (1997 年突变的西面)。此外, 在大西洋还有一些

零星的升温和降温突变。

3.1.8 海温变化的敏感区

江志红等^[39]讨论了全球温度场上年代际的区域特征, 得到了一些有新意、值得关注的事实和观点, 这里立意于讨论全球海表温度场年代际突变的敏感区。在每个突变时期中, 最早的突变区域是我们非常关心的, 因为它对于年代际突变的预报有一定的指示意义。为此, 我们把最早发生突变并且突变区域由此扩大的地区 (最早的突变区域较小的或者突变区域没有扩大的不包括在内, 如 1954 年的突变和 1920 年印度洋的突变) 列表 (表 1)。此外, 还需要说明的是, 1894 年发生在中、东太平洋的升温突变, 我们分别把它算进了赤道中太平洋和赤道东太平洋的突变区域。

在历次的突变时期中, 太平洋上都有最早的突变信号 (见表 1)。以赤道太平洋地区开始的突变过程有 4 次, 共 5 个区域, 其中 4 个区域为升温突变, 1 个为降温突变 (见表 2)。赤道西、东太平洋各有 2 个突变区域, 赤道中太平洋有 1 个区域, 始于赤道中、西太平洋的突变均为升温突变, 西太平洋以 1994 年的突变区域最大, 其余相对较小。

其次是南太平洋开始的突变时期共有 4 次, 共 5 个区域。中低纬度地区有 4 个最早突变区域, 主要位于在澳大利亚以东海域; 高纬度地区有 1 次, 大致位于德雷克海峡以西附近海域。

再次为北太平洋、北大西洋和南印度洋, 以它们开始的突变过程各有 2 次, 各有 2 个区域。在北太平洋的两个突变区域较相近, 并且两个始于北太平洋的两次突变均为降温, 而始于南印度洋的两次突变均为升温。

最早始于南大西洋的年代际突变有 1 次, 是降温过程。

从以上分析, 我们大致可以得出几个可能的海温年代际变化的敏感区, 首先是赤道太平洋和南太平洋, 其次是北太平洋、北大西洋和南印度洋, 再次为南大西洋地区 (具体区域见表 1)。对于年代际尺度上的海温变化, 北太平洋已经有较多的研究^[1~22], 而对于赤道太平洋和南太平洋的研究相对较少, 这些区域的研究有待于进一步深入。

3.2 GSST 的年代际模式

海温变化最为显著的往往是某一两年, 如我们所熟知的 1976/1977 年。因此, 我们需要确定

表 1 历次突变过程中最早突变区域，及其突变年份和性质

Table 1 Pioneer abrupt change areas, together with its abrupt change years and characters, in each process of abrupt changes

突变过程	最早突变年份及性质	最早突变区域
1894 ~ 1901	1894 年降温突变	北太平洋中部 (38 N ~ 48 N, 166 W ~ 176 W)
	1894 年降温突变	南太平洋西部 (32 S ~ 42 S, 160 E ~ 180 E)
	1894 年降温突变	南大西洋地区 (50 S ~ 60 S, 20 W ~ 52 W)
	1894 年升温突变	赤道中、东太平洋 (20 S ~ 16 N, 100 W ~ 154 W)
	1894 年升温突变	南太平洋南部 (42 S ~ 56 S, 120 W ~ 150 W)
1905 ~ 1909	1905 年降温突变	赤道东太平洋 (12 S ~ 6 N, 82 W ~ 98 W)
	1905 年降温突变	南太平洋东部 (44 S ~ 68 S, 84 W ~ 100 W)
1920 ~ 1930	1920 年升温突变	赤道西太平洋 (2 S ~ 8 N, 138 E ~ 152 E)
1939 ~ 1945	1939 年降温突变	北大西洋 (32 N ~ 40 N, 50 W ~ 60 W)
	1939 年升温突变	南太平洋 (4 S ~ 14 S, 170 E ~ 150 W)
	1939 年升温突变	南印度洋 (50 S ~ 60 S, 10 E ~ 70 E)
1973 ~ 1979	1973 年升温突变	南印度洋中部 (36 S ~ 44 S, 76 E ~ 100 E)
	1973 年降温突变	北太平洋中部 (30 N ~ 38 N, 164 E ~ 170 W)
1994 ~ 1998	1994 年升温突变	赤道西太平洋 (0 ° ~ 16 N, 116 E ~ 160 E)
	1994 年升温突变	南太平洋 (24 S ~ 36 S, 136 W ~ 150 W)
	1994 年升温突变	北大西洋东部 (20 N ~ 40 N, 10 W ~ 40 W)

表 2 表 1 中最早突变区域数目的分区统计表

Table 2 Partition table for number of pioneer abrupt change areas in Table 1

最早的突变 区域所在地	最早突变区 域的个数	所属突变过 程的个数	最早突变区域 中升温的个数	最早突变区域 中降温的个数
北太平洋	2	2	0	2
南太平洋	5	4	3	2
赤道太平洋	5	4	4	1
赤道中太平洋	1	1	1	0
赤道东太平洋	2	2	1	1
赤道西太平洋	2	2	2	0
南印度洋	2	2	2	0
北大西洋	2	2	1	1
南大西洋	1	1	0	1

GSST 年代际突变中变化最显著的年份，才可以研究不同年代际背景下 GSST 场的空间差异。距平场的 EOF 分解反映的是空间场绝对变率的大小，空间场上绝对变率越大的变动就对应于时间系数越明显的跳跃，因此，整个空间场的年代际信号可以由距平场 EOF 分解的时间系数来表征。由此，对全球场的距平场进行 EOF 分解，第一特征向量场的解释方差为 28 %，其时间系数反映的是趋势变化（图略），第二特征向量场（图 3a）的解释方差为 15 %，它的时间系数反映的是年代际信号，用 MTT 对其进行突变检验（见图 3b）。

由图 3b 可以看出，GSST 的年代际突变时间依次为 1894、1907、1924、1942、1956、1976 和 1997 年。从第二特征向量场（见图 3a）可以看出，太平洋上呈现的是 PDO 模态，它在南北半球大致为对称结构，只是在北太平洋西部有小范围为正，在南太平洋接近极地海域也为正。印度洋以 30 S 为界大致为南北结构，在 30 S 以北印度洋的东西结构较为明显，正的结构（东部结构）占主导地位，在印度洋北部的阿拉伯海地区为负。在大西洋上，北大西洋为正，其余海域为负，显示出比较明显的南北结构。

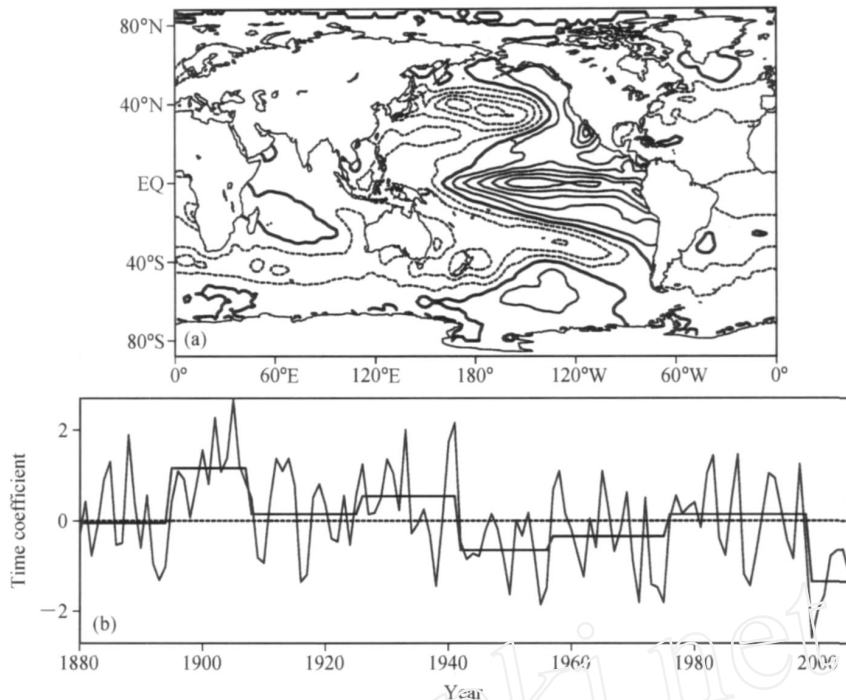


图3 (a) 全球海表温度第二特征向量场, 解释方差为 15%, 负值为点线, 零线加粗, 等值线间隔为 0.1; (b) 向量场对应的时间系数及其以突变点为界的分段平均

Fig.3 (a) The second eigenvector field of GSST. The explained variance is 15%. Negative contours are dashed; the zero contour is thickened. Contour interval is 0.1; (b) its corresponding time coefficient and episode average between abrupt points

在 GSST 特征向量场中, 太平洋呈现为 PDO 模态, 它是静态的, 显示的是特征向量场的整体状态; 在 GSST 年代际突变场中, 各个突变时期太平洋的突变分布也大体呈现为 PDO 模态, 只是各个突变过程的突变分布范围有所不同, 在这里 PDO 显示的是一个动态变化的过程, 即太平洋的突变自某一处开始直至结束。在 GSST 年平均场中, PDO 型的突变分布反映了 GSST 所有的突变过程, 只是 1920 ~ 1930 时段的 PDO 分布型不明显, 而 Mantua 等^[12, 20]指出 PDO 在 1925 年发生了突变, 可能是因为他所指出的突变是在冷季 (11 ~ 3 月), 而我们所说的是在年平均场, 符淙斌等^[40]也指出 20 世纪 20 年代的突变在冬季的信号比较明显。

EOF 分解得到的反映年代际变化的模态, 只是最接近于各个年代际背景下的模态, 并不能较好地反映各个年代际背景下的模态。由此, 本文对 GSST 年代际突变年份前后的时段做合成差分析, 均为后一时段的均值减去前一时段的均值, 即 1895 ~ 1906 减去 1880 ~ 1893, 1908 ~ 1923 减去 1895 ~ 1906, 1925 ~ 1941 减去 1908 ~ 1923, 1943 ~ 1955

减去 1925 ~ 1941, 1957 ~ 1975 减去 1943 ~ 1955, 1977 ~ 1996 减去 1957 ~ 1975 和 1998 ~ 2005 减去 1977 ~ 1996 (见图 4)。这样不但可以反映 GSST 年代际突变前后的空间场的差异, 同时也是后一时段相对于前一时段的变化所呈现的年代际突变的模态 (简称年代际模态), 也就是说图 4a ~ g 分别是 1896 ~ 1906、1908 ~ 1923、1925 ~ 1942、1944 ~ 1955、1957 ~ 1975、1977 ~ 1996 和 1998 ~ 2005 时段 GSST 所呈现的年代际模态 (见图 4), 由于各个突变时期内都包含有年代际趋势的变化, 而且空间场上各点、各区域的突变时间不尽相同, 因此, 空间场上某一年前后年代际背景下有显著性差异的区域和各个突变过程中突变的范围就会有所差异。

3.2.1 GSST 各个时段年代际模态的基本特征

在太平洋上, SST 各个时段的年代际模态均表现为 PDO 模态, 只是不同时期的范围和强度有所不同, 印度洋和大西洋主要表现为大致的南北型分布或者全场一致的变化趋势 (见图 4)。

在 1895 ~ 1906 时段的年代际模态 (图 4a) 中, 赤道太平洋地区和北太平洋地区是反位相的变化趋

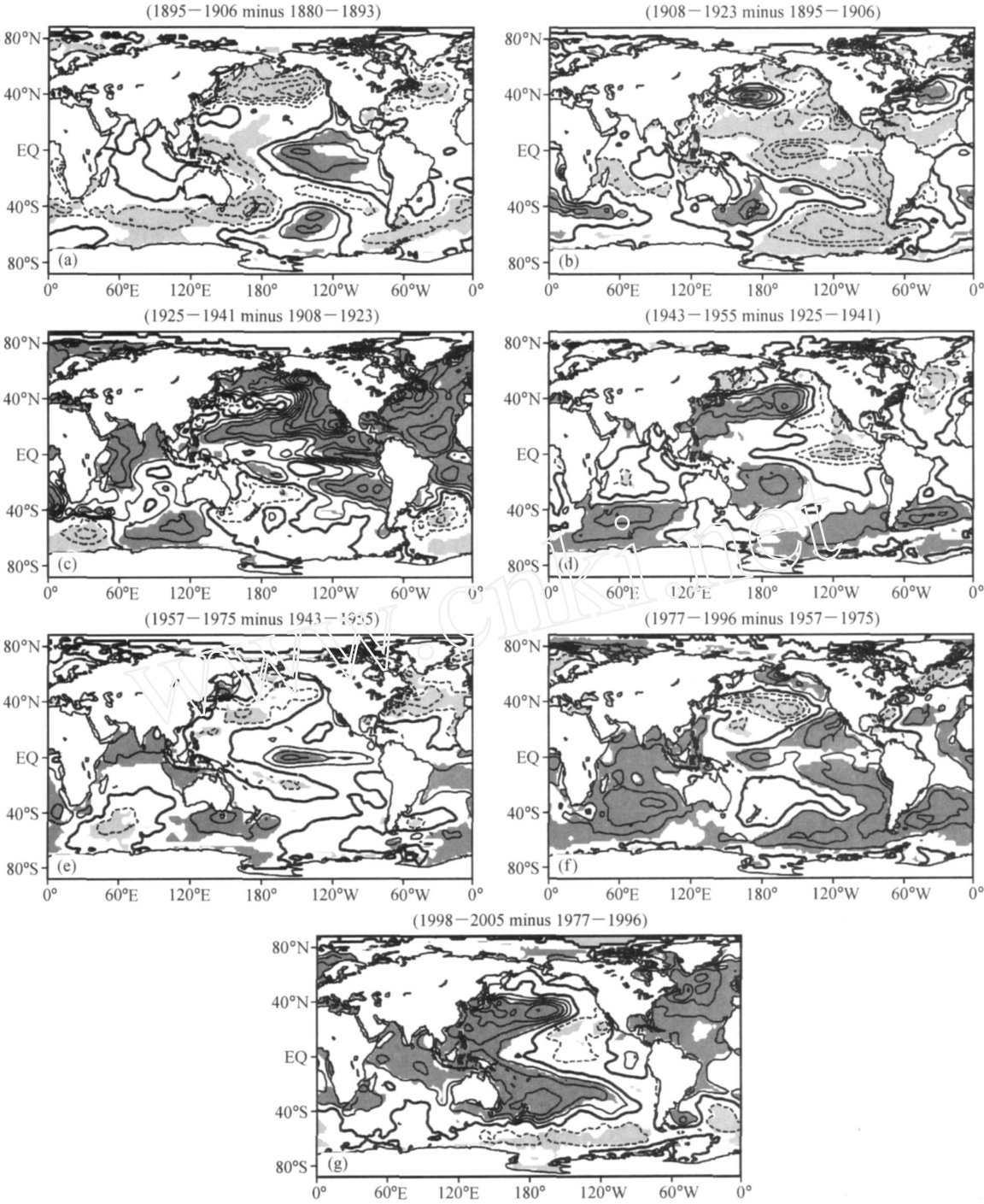


图4 合成差分析所呈现的各时段 GSST 的年代际模式: (a) 1895 ~ 1906 年; (b) 1908 ~ 1923 年; (c) 1925 ~ 1941 年; (d) 1943 ~ 1955 年; (e) 1957 ~ 1975 年; (f) 1977 ~ 1996 年; (g) 1998 ~ 2005 年。等值线间隔为 0.2 , 负值为点线, 零线加粗; 阴影是通过 95 %信度的置信区域

Fig.4 Composite difference maps for the decadal modes of GSST during (a) 1896-1906 , (b) 1908-1923 , (c) 1925-1941 , (d) 1943-1955 , (e) 1957-1975 , (f) 1977-1996 and (g) 1998-2005. The confidence level of shading is 95 % . Contour interval is 0.2 . Negative contours are dashed; the zero contour is thickened

势,在南半球不太明显。印度洋大致以 35°S 纬线为界呈现为南冷-北暖型分布。大西洋大部分海域表现为降温。

在 1908~1923 时段的年代际模态(图 4b)中,赤道太平洋和美洲太平洋沿岸的海温显著降低,但是南、北太平洋升温区域相对较小。印度洋主要为变冷趋势,印度洋的低纬地区大致为西冷-东暖型分布,非洲南端以南海域变暖。大西洋呈现出正负相间的显著变化趋势,但增暖占了大部分海域。

在 1925~1941 时段的年代际模态(图 4c)中,南、北太平洋的降温范围较小,但赤道太平洋和美洲太平洋沿岸的升温比较显著。大西洋大致以 35°S 纬线为界呈现北暖-南冷型分布,也是增暖占主导地位。除好望角以南海域,印度洋其他海域表现为升温,但在其中部不显著。

在 1943~1955 时段的年代际模态(图 4d)中,太平洋是较为明显的 PDO 模态,南、北太平洋升温,赤道东太平洋降温。印度洋和大西洋大致以 35°S 纬线为界都表现为北冷-南暖型,大西洋主要是变冷占主导地位。

在 1957~1975 时段的年代际模态(图 4e)中, PDO 模态不明显,南北太平洋的降温,赤道东太平洋升温,显著区域较小。印度洋以 25°S 纬线为界大致表现为北暖-南冷型分布,大西洋以 25°N 纬线为界大致表现为南暖-北冷型分布,增暖占了主导地位。

在 1977~1996 时段的年代际模态(图 4f)中,太平洋呈现为较明显的 PDO 模态,只是在南太平洋的降温幅度较小,不显著。印度洋表现为一致的升温。大西洋以 50°N 纬线为界大致表现为北冷-南暖型分布,增暖占主导地位。和世界洋流分布图(图略)对比,可以看出,在这一时段 GSST 的年代际模态中,全球洋流中的寒流均减弱了,即寒流的温度升高了。此外,南、北太平洋和北大西洋海域的暖流也减弱了,其余海域的暖流均为增强。

在 1998~2005 时段的年代际模态(图 4g)中,太平洋表现为较弱的 PDO 模态,在南、北和西太平洋的升温很显著,赤道东太平洋为增温,太平洋其余大部分地区为变冷。南、北太平洋的最大升温幅度都达到了 0.8 以上。在北太平洋东部最大降温幅度达 0.4 以上。印度洋并非严格意义上的南北结构,大致以 35°S 纬线为界。大西洋以 35°S 纬

线为界大致呈现为北暖-南冷型分布,最大升温幅度在 1.0 以上,并且是增暖占主导地位。绕极环流基本上呈现为降温,而且显著区域较大,最大降温幅度达 0.2 以上。北冰洋中心也是显著的降温。

在大西洋,只有在 1895~1906 时段的年代际模态大致表现为全场变冷,1908~1923 年是冷暖相间行分布,但增暖占了主导地位,其余模态均为南北型分布,在南半球的分界线大致分布在 35°S 附近的纬带,北半球并无一定的纬度。在大西洋南北结构的年代际模态中,1943~1955 时段的年代际模态中变冷是主导地位,其余时段的年代际模态都是增暖趋势占据了大部分海域。由此可见,大西洋年代际模态的南北型分布具有不对称性(不以赤道对称),而且是以增暖占主导地位的年代际模态居多。并且在非季节模态中,Hsiung 等^[41]也发现了大西洋上正位相占主导地位的南北结构,在本文的 GSST 模态中,大西洋也存在比较明显的南北结构(见图 3a)。在印度洋,1925~1941 和 1977~1996 时段大致为全场一致的变化,1908~1923 时段的结构不明显,其余模态大致表现为南北型分布,分界线大致在 35°S 纬线左右。

3.2.2 GSST 年代际模态的位相关系及强度

如图 4 所示,就 GSST 年代际模态的空间分布而言,1895~1906 和 1908~1923 时段的年代际模态在印度洋的中部和北部,太平洋及南大西洋的反位相结构较为明显。1925~1941 和 1943~1955 时段在南印度洋,大西洋和除北太平洋外的太平洋海域存在较为明显的反位相结构,1943~1955 和 1957~1975 时段的年代际模态在印度洋,太平洋上大体存在反位相结构,大西洋上的模态为南北结构,只是由变冷占主导变成增暖占主导地位。1977~1996 和 1998~至今时段太平洋、绕极环流的反位相结构较为明显,大西洋变暖占主导地位,由南暖-北冷型转换成南冷-北暖型。

合成差分分析可以清楚地呈现 GSST 的年代际模态,但是这并不能说明这些模态相互的强弱关系。我们可以借助于图 3b 来了解 GSST 年代际模态的强度,1895~1906、1925~1941 和 1977~1996 三个年代际模态处在正位相,1943~1955、1957~1975 和 1998~至今时段处于负位相,1880~1993 和 1908~1923 时段的两个年代际模态接近零位相,

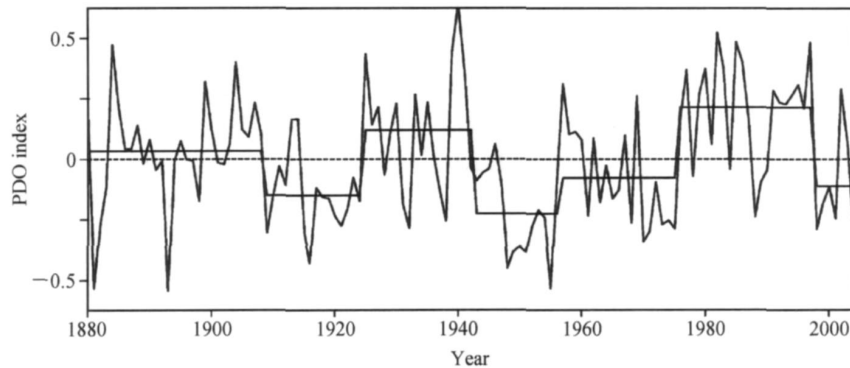


图5 PDO指数的及其以95%置信度的突变点为界的分段平均

Fig.5 PDO (the Pacific decadal oscillation) index and episode average between abrupt points significant at 95 % confidence level

假如1997年这次突变存在的话,就目前的状态来看,1998~至今时段的年代际模态的强度最强。

3.2.3 PDO的年代际突变及其强度

PDO是全球年代际变率最强、最重要的信号之一,是气象学者研究的焦点^[12, 14, 20],尤其是与我国气候变率的联系,也引起了我国气象学者的充分重视^[42~45]。太平洋的SST也经历了数次突变,那么PDO的年代际突变又发生在什么时间?它和GSST突变的时间一致吗?

PDO年代际突变的年份依次为1908、1924、1942、1956、1976和1997年(见图5)。除1894年外,其余的突变时间与GSST的突变时间基本是一致的,这说明PDO是全球海表温度场年代际突变的重要成员之一,可以解释GSST场大部分的年代际突变。太平洋在19世纪90年代也有突变发生,而为什么PDO却没有这次突变呢?可能在19世纪90年代GSTT最主要的信号不在冷季(11月~3月),这还有待于进一步的工作来验证。这些突变时间与Chao等^[46]用空间滞后相关发现的太平洋的年代际突变时间1924/1925、1941/1942、1957/1958和1976/1977也是基本一致的。与Mantua等^[12, 20]确定的1890、1925、1947和1976年的突变略有差异,本文没有1890年这次突变,而且20世纪40年代的突变时间也有差异,这可能是资料的差异造成的。Schwing等^[47]用扫描式 t 检验方法发现PDO的年代际突变的时间为1915、1924、1942、1961、1976和1988年,其中1924、1942和1976年与本文是一致的,另外三次突变时间不一致,可能是由于方法差异或者考虑的时间尺度不同所造成的。

从图5可以看出,PDO在1880~1907、1925~1941和1977~1996时段处于正位相;在1909~1923、1943~1955、1957~1975和1998至今时段同处于负位相,1977~1996时段是PDO较强的正位相,1925~1941时段是比较弱的正位相,1880~1906时段是最弱的正位相(接近零位相)。1943~1955时段的年代际模态是较强的负位相,1909~1923、1957~1975和1998~2005这三个时段是较弱的负位相。假如1998~至今时段是PDO一个新的年代际背景,就当前的强度而言,大体与1909~1923和1957~1975这两个时期强度相当。

4 小结和讨论

本文用MTT对全球海表温度场的年代际突变进行了定量的检验,主要有以下几点结论:

(1) 从1880年至今,共有7个主要的突变时期:1894~1901、1905~1909、1920~1930、1939~1945、1954~1958、1973~1979和1994~1998年。从EOF分析第二模态的时间系数可以看出,从1880年至今,GSST经历的年代际突变发生在1894、1907、1924、1942、1956、1976和1997年。依据1880年至今每个年代际突变过程中突变最先开始的时间,赤道太平洋和南太平洋发生突变的次数最多,其次是北太平洋、北大西洋和南印度洋,再次为南大西洋,它们可能是海温年代际变化的敏感区,赤道太平洋和南太平洋的研究有待于加强。

(2) 本文用合成差分分析给出了GSST各个时期的年代际模态,在太平洋上,GSST各个时期的年代际模态均表现为PDO特征,不同时期的范围和强度有所不同,印度洋和大西洋各自主要表现为南

北型分布或者全场一致的变化趋势。大西洋的南北分布具有不对称性,主要以增暖占优势。1896~1906 和 1908~1923、1925~1941 和 1943~1955、1977~1996 和 1998~2005 这三对年代际模态的大部分海域大体上存在反位相结构。就其年代际模态的强度而言,1895~1906、1925~1941 和 1977~1996 三个年代际模态处在正位相,1943~1955、1957~1975 和 1998~至今时段处于负位相,1880~1993 和 1908~1924 两个年代际模态接近零位相,就目前的状态来看,1998~至今时段的年代际模态的强度最大。在 1977~1996 时段的年代际模态中,全球洋流中的寒流均减弱了。

(3) PDO 年代际突变的年份依次为 1908、1924、1942、1956、1976 和 1997 年。除 1894 年外,其余突变时间与 GSST 的突变时间基本是一致的,这说明 PDO 是全球海表温度场年代际突变的重要成员之一。PDO 在 1880~1906、1925~1941 和 1977~1996 时段处于正位相;在 1909~1923、1943~1955、1957~1975 和 1998~至今时段同处于负位相。从年代际模态的分布(见图 4)来看,正位相对应于北太平洋海温较低时期(1925~1941 时段不明显),负位相对应于北太平洋海温较高时期。

假如,1998~至今时段是全球海表温度一个新的年代际背景,就其目前的年代际模态的强度而言,比 1943~1955 时段的年代际模态的强度还要强,就 PDO 来说,其目前的强度大体与 1909~1923 和 1957~1975 这两个时段是相当的。这次突变在大气、海洋和生态系统所造成的影响都是值得我们深入研究的课题,这对于未来一段时间内农业、渔业、水资源和公共健康等方面都有可能产生重要影响,也是我们需要进一步研究的重要课题。

海洋和大气都是气候系统的成员,大尺度海气相互作用对气候的形成和变化都有重要影响。海洋和大气的变化往往联系在一起的,大气环流中的年代际突变信号也是我们非常关心的问题。符淙斌等^[47, 48]发现西太平洋赤道辐合带风速矢量在 1902 和 1930 年附近发生了转向,并且印度季风也发生了转型,1900 年前后的气候突变在温度场表现为小冰期结束前的最后一次降温。符淙斌等^[49]发现北半球的增暖主要表现在 20 世纪 20~40 年代,在 20 和 30 年代各有一次明显的增温,南亚夏季风也

出现了两次明显的加强过程。20 世纪 70 年代的突变信号已有较多的研究^[1~21]。这些突变也和我国的气候变化是联系在一起的^[50, 51],这些突变时间与本文海洋上的突变信号在时间上基本是一致的。那么,在已知的这几次突变当中,到底是大气影响海洋,还是海洋影响了大气,还是它们各自互相在年代际尺度上并没有多大的影响?这是摆在气象学者面前重要的课题,有待于广大气象学者深入研究。

此外,我们还用 MTT 检验了大气中的年代际突变信号,除了所熟知的 1964 和 1976 年左右时段的突变,还有 1953、1987 和 1997 年左右时段的突变,反映了突变在空间分布上的差异。这些工作正在进一步的整理当中。

参考文献 (References)

- [1] Quinn W H, Neal V T. Recent climate change and the 1982-83 El Niño. *Proc. Eighth Annual Climate Diagnostic Workshop*, Downsview, ON, Canada, NOAA, 1984, 148~154
- [2] Quinn W H, Neal V T. Recent long-term climate change over the eastern tropical and subtropical Pacific and its ramifications. *Proc. Ninth Annual Climate Diagnostic Workshop*, Corvallis, OR, NOAA, 1985, 101~109
- [3] Nitta T, Yamada S. Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1989, **67**: 375~383
- [4] Trenberth K E. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1990, **71**: 988~993
- [5] Ebbesmeyer C C, Cayan D R, Mc Lain D R, et al. 1976 step in the Pacific climate: Forty environmental changes between 1968-1975 and 1977-84. *Proc. Seventh Annual Pacific Climate (PACCLIM) Workshop*, Pacific Grove, CA, California Dept. of Water Resources, 1991, 115~126
- [6] Kelly P M, Wigley T M L. Solar cycle length, greenhouse forcing and global climate. *Nature*, 1992, **360**: 328~330
- [7] Graham N E. Decadal-scale climate variability in the 1970s and 1980s: Observations and model results. *Climate Dyn.*, 1994, **10**: 135~162
- [8] Latif M, Barnett T P. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, 1994, **266**: 634~637
- [9] Kushnir Y. Interdecadal variations in the North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *J. Climate*, 1994, **7**: 141~157
- [10] Trenberth K E, Hurrell J W. Decadal atmospheric-ocean variations in the Pacific. *Climate Dyn.*, 1994, **9**: 303~319

- [11] Wang X L, Ropelewski C F. An assessment of ENSO-scale secular variability. *J. Climate*, 1995, **8**: 1584 ~ 1599
- [12] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 1069 ~ 1079
- [13] Yasuda T, Hanawa K. Decadal changes in the mode waters in the midlatitude North Pacific. *J. Phys. Ocean.*, 1997, **27**: 858 ~ 870
- [14] Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *J. Climate*, 1997, **10** (5): 1004 ~ 1020
- [15] White W B, Cayan D R. Quasi-periodicity and global symmetries in interdecadal upper ocean temperature variability. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 21335 ~ 21354
- [16] Zhang R H, Rothstein L M, Busalacchi A J. Origin of upper-ocean warming and El Niño change on decadal scales in the tropical Pacific Ocean. *Nature*, 1998, **391**: 879 ~ 883
- [17] Garreaud R D, Battisti D S. Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the Southern Hemisphere tropospheric circulation. *J. Climate*, 1999, **12**: 2113 ~ 2123
- [18] Lau K M, Weng H. Interannual, decadal-interdecadal, and global warming signals in sea surface temperature during 1955-97. *J. Climate*, 1999, **12**: 1257 ~ 1267
- [19] Gille S T. Warming of Southern Ocean since the 1950s. *Science*, 2002, **295**: 1275 ~ 1277
- [20] Mantua N J, Hare S R. The Pacific decadal oscillation. *J. Oceanography*, 2002, **58**: 35 ~ 44
- [21] Deser C, Phillips A S, Hurrell J W. Pacific interdecadal climate variability: Linkages between the tropics and the North Pacific during boreal winter since 1900. *J. Climate*, 2005, **17**: 3109 ~ 3124
- [22] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, **16** (4): 482 ~ 493
Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1992, **16** (4): 482 ~ 493
- [23] 李建平, 丑纪范, 史久恩. 气候突变的完备定义及类型. 北京气象学院学报, 1996, (1): 7 ~ 12
Li Jianping, Chou Jifan, Shi Jiuen. Complete definition and types of abrupt climatic change. *J. Beijing Meteor. College* (in Chinese), 1996: (1), 7 ~ 12
- [24] 朱锦红, 王绍武. 年代际气候变率. 见: 王绍武编. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001. 348 ~ 370
Zhu Jinhong, Wang Shaowu. Decadal variability. *Advance in Modern Climatology Studies* (in Chinese), Wang, S., Ed. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 348 ~ 370
- [25] Mehta V, Lindstrom E, Busalacchi A, et al. Proceedings of the NASA workshop on decadal climate variability. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2001, **81**: 2983 ~ 2985
- [26] Smith T M, Reynolds R W. Improved extended reconstruction of SST (1854-1997). *J. Climate*, 2004, **17**: 2466 ~ 2477
- [27] 李建平, 丑纪范, 史久恩. 气候均值突变的检测方法. 北京气象学院学报, 1996, (2): 16 ~ 21
Li Jianping, Chou Jifan, Shi Jiuen. Detecting methods on the mean value jump of the climate. *J. Beijing Meteor. College* (in Chinese), 1996, (2): 16 ~ 21
- [28] 李建平, 史久恩. 一百年来全球气候突变的检测与分析. 大气科学, 1993, **17** (增刊): 132 ~ 140
Li Jianping, Shi Jiuen. The detection and analysis of the abrupt change of the global climate during the last 100 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1993, **17** (Suppl.): 132 ~ 140
- [29] Jiang J M, You X. Where and when did an abrupt climatic change occur in China during the last 43 years? *Theor. Appl. Climatol.*, 1996, **55**: 33 ~ 40
- [30] Freadrich K, Jiang J M, Gerstengarbe W. et al. Multiscale detection of abrupt climate changes: Application to River Nile flood levels. *Intern. J. Climatol.*, 1997, **17**: 1301 ~ 1305
- [31] 李建平, 史久恩, 林学椿, 等. 关于 Mann-Kendall 方法用于检测气候突变功效的研究. 数理管理与统计, 1995 (增刊), 148 ~ 153
Li Jianping, Shi Jiuen, Lin Xuechun, et al. Discussion on the efficiency of the Mann-Kendall test to detect the abrupt climatic change. *Mathematic Statistics* (in Chinese), 1995 (Suppl.): 148 ~ 153
- [32] 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. 南京气象学院学报, 1997, **20** (4): 505 ~ 510
Deng Ziwan, You Weihong, Lin Zhenshan. Application of wavelet transformation to analysis of multiple time scales climate change. *J. Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1997, **20** (4): 505 ~ 510
- [33] 江剑民, Fraedrich K, 邹耀仁. 多尺度突变现象的扫描式 t 检验方法及其相关性分析. 地球物理学报, 2001, **44** (1): 31 ~ 39
Jiang Jianmin, Fraedrich K, Zou Yaoren. A scanning t test of multiscale abrupt changes and its coherence analysis. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2001, **44** (1): 31 ~ 39
- [34] Jiang J M, Mendelssohn R, Schwing F, et al. Coherency detection of multiscale abrupt changes in historic Nile flood levels. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (8): 1121 ~ 1124
- [35] Afifi A A, Azen S P. *Statistical Analysis, A Computer Oriented Approach*. Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich Publishers. New York. 1972, 366
- [36] 张德二, 刘传志, 江剑民. 中国东部六区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析. 第四纪研究, 1997, (1): 1 ~ 11
Zhang Deer, Liu Chuanzhi, Jiang Jianmin. A reconstruction and analysis of climatic wetness-series in recent 1000 years in

- 6 regions of eastern China. *Research of the Quaternary* (in Chinese), 1997, (1): 1~11
- [37] 严中伟, 李兆元, 王晓春. 历史上 10 年-100 年尺度气候跃变分析. *大气科学*, 1993, **17** (6): 663~671
- Yan Zhongwei, Li Zhaoyuan, Wang Xiaochun. An analysis of decade-to-century-scale climatic jumps in history. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1993, **17** (6): 663~671
- [38] Hammersley J M. Discussion of paper. *Journal of the Royal Statistic Society*, 1946, **8**: 91
- [39] 江志红, 李建平, 屠其璞, 等. 20 世纪全球温度年代和年代际变化的区域特征. *大气科学*, 2004, **28** (4): 545~558
- Jiang Zhihong, Li Jianping, Tu Qipu, et al. Regional characteristics of the decadal and interdecadal variations for global temperature field during the last century. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (4): 545~558
- [40] 符淙斌. 气候突变现象的研究. *大气科学*, 1994, **18** (3): 373~384
- Fu Congbin. Studies on the observed abrupt climatic changes. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18** (3): 373~384
- [41] Hsiung J, Newell R E. The principal nonseasonal modes of variation of global sea surface temperature. *J. Phys. Ocean.*, 1983, **13**: 1957~1967
- [42] 李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 年代际气候变化研究. *气候与环境研究*, 2002, **7** (2): 209~219
- Li Chongyin, Zhu Jinhong, Sun Zhaobo. The study of interdecadal variation. *Climate and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 209~219
- [43] 咸鹏, 李崇银. 北太平洋海温变化的年代际模及其演变特征. *大气科学*, 2003, **27** (5): 861~868
- Xian Peng, Li Chongyin. Interdecadal modes of sea surface temperature in the North Pacific Ocean and its evolution. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (5): 861~868
- [44] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与我国气候变率的联系. *气象学报*, 2003, **61** (6): 641~654
- Zhu Yimin, Yang Xiuqun. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China. *Acta Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **61** (6): 641~654
- [45] 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 太平洋年代际振荡的研究进展. *大气科学*, 2004, **28** (6): 979~992
- Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et al. Advances in studies of Pacific Decadal Oscillation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (6): 979~992
- [46] Chao Y, Ghil M, McWilliams J C. Pacific interdecadal variability in this century's sea surface temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**: 2261~2264
- [47] Schwing F B, Jianmin J M, Mendelssohn R. Coherency of multi-scale abrupt changes between the NAO, NPI, and PDO. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (7): 591~594
- [48] Fu C B, Fletcher J. Large signal of climate variation in Asian monsoon region—Northern summer. In: *Proceedings of the 7th Annual Climate Diagnostic Workshop*, NCAR, Boulder, Oct. 18-22, 1982, 223~230
- [49] Fu C B, Wang Q. On the abrupt change in South Asian summer monsoon climate and its synchronism with the global rapid warming. *Science in China (Ser. B)*, 1991, **35** (7): 666~672
- [50] 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征. *大气科学*, 2005, **29** (5): 671~681
- Ma Z G, Huang G, Gan W Q, et al. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over Northern China during the last century. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (5): 671~681
- [51] 黄荣辉, 蔡荣硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系. *大气科学*, 2006, **30** (5): 730~743
- Huang R H, Cai R S, Chen J L, et al. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asia climate system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 730~743