

近百年全球平均气温年际变率中的 QBO 长期变化特征*

丁裕国 余锦华 施能

(南京气象学院, 南京 210044)

p423 A

摘要 应用奇异谱分析 (SSA) 方法和奇异交叉谱分析 (SCSA) 方法, 对全球及南北半球近 100 多年 (1856~1997 年) 逐月地面气温距平序列中的准两年周期振荡 (QBO) 的长期演变特征进行诊断分析。结果表明: 全球平均气温序列蕴含显著的 QBO 分量, 它们与全球气候系统中其他各个子系统所隐含的 QBO 信号具有各种耦合对应关系, 尤其突出地表现在 Niño 区海温和以 SLP 序列为代表的全球大气环流系统中 QBO 信号的耦合对应关系上。而平均气温的 QBO 的年代际特征及其变率的阶段性, 不但表现在振幅上, 而且其位相亦很明显。上述特征在全球、两半球具有明显的差异。

关键词: 全球平均气温; 奇异谱分析; 奇异交叉谱分析; QBO 年代际变化

1 引言

自 60 年代初 Reed 等^[1]最早发现赤道平流层低层风场的准两年周期振荡 (QBO) 现象以来, QBO 的研究一度吸引了不少气候学家的关注, 并建立了相应的理论。例如用波与平均流的相互作用来解释 QBO 受到普遍重视。对于气候要素的 QBO 问题, Landsberg^[2]早就作过总结。1969 年 Angell 等人^[3]研究发现大气活动中心存在显著的准两年周期, 1971 年 Wagner^[4]在分析北半球海平面季节气压的功率谱中亦发现明显的准两年周期。也许是由于 QBO 信号强度和范围相对而言不如 ENSO 信号的缘故, QBO 及其形成机制的研究一直未受到高度的重视。直到 80 年代, 愈来愈多的观测事实表明, 在对流层大气环流以及地面气象要素的变化中几乎普遍存在着准两年周期振荡现象。尽管对流层 QBO 的形成机制及其特征与赤道平流层 QBO 并非一样, 仍有不少研究表明: 准两年周期现象可能是大气环流和气候变化中的一种重要特征。近 20 年来, 有关地面气象要素的准两年周期现象受到前所未有的关注, 而其研究内容和方法更加广泛与多样, 如 1980 年 Walsh 等^[5]分析美国地面气压、气温和降水要素发现, 存在显著的准两年周期, 1983 年 Mooley 等^[6]分析印度夏季降水旱涝指数功率谱亦发现明显的准两年振荡现象, 1985 年 Mukerjee 等^[7]分析发现印度季风降水准两年振荡与平流层 QBO 有很高的相关, 即平流层的东风位相期, 印度季风雨偏少。1983 年 Barnett^[8]利用 CEOF 来揭示存在于太平洋季风序列内的准两年周期, 指出它的空间振幅最大区域及位相传播的自西向东方向, 1984 年 Trenberth 等人^[9]用同一方法, 发现北半球地面气压

1999-07-22 收到, 2000-01-31 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49875019

场存在空间上的准两年周期波动为驻波的主要特征。王绍武等^[10]用谱分析方法对我国若干测站旱涝级别序列(500年年序列)进行分析,发现在长江流域与黄河北部地区某些站点具有准两年周期。1988年黄嘉佑^[11]利用主分量和复主分量分析方法对我国逐月降水量序列分析表明,存在显著的准两年周期,并指出这种周期振荡的空间波是一行波,传播方向为自东(或东北)至西(或西南)的纬向方向。近年来国内其他学者也先后用功率谱、最大熵谱分析、RPCA、CPCA及EEOF等方法研究我国气候要素序列中存在的显著准两年振荡现象。

事实上,关于QBO的形成机制历来受到重视,在不断发现对流层大气环流及地面气象变化也存在准两年周期的同时,许多学者已经注意到:(1)平流层QBO在对流层气候变化中有所反映^[12];(2)在长期预报中QBO已成为重要组成部分;(3)ENSO与QBO有一定联系;(4)QBO对太阳活动11年周期与气候的相关关系有影响。例如,1990年Rasmusson等^[13]指出,热带普遍存在准两年振荡分量,ENSO与4~5年及2年振荡模式的相对位相有关。并指出热带东印度洋及中、西太平洋有特别重要的意义,亚洲季风与西太平洋暖池的相互作用可能是ENSO发展的一个重要机制。Mooley提出的两年振荡机制认为,印度季风降水经常是旱涝交替并与赤道东太平洋暖、冷事件相对应。1984年Gray^[14]讨论了平流层QBO与ENSO的关系,指出平流层纬向风可能影响ENSO的强度与频率。1989年Shapiro^[15]研究大西洋风暴与QBO的关系时发现,当处于QBO的西风位相时,大西洋风暴的相对数目较多。李崇银等^[16-18]在研究准两年周期振荡对东亚大气环流和气候的影响时,得出平流层QBO的演变特征是:东西风转换最早出现在印度洋赤道地区,中国东部降水量、气温和东亚急流都有准两年周期变化,并同平流层QBO有密切联系;平流层QBO对西太平洋台风活动也有一定影响,QBO的西风位相期西太平洋台风偏少,而ENSO对平流层QBO也有明显影响,一般在ENSO发生之后,QBO的西风位相持续时间短。并指出,西太平洋副高活动有准两年振荡特征,副高的相对强度和副高脊线位置都清楚地表现出这种振荡。平流层纬向风的垂直切变同西太平洋副高活动有关,东(西)风切变对应着脊线位置偏北的较强(弱)副高形势。平流层低层东(西)风垂直切变在赤道对流层上部引起的异常上升(下沉)运动,导致哈得来环流的异常加强(减弱)可能是平流层QBO影响西太平洋副高准两年振荡的重要机制。

综上所述,虽然平流层QBO自60年代发现以来,分别在其形成机制和特征方面已有大量研究,但是,广义地说,准两年周期也是大气环流和气候(要素)变化中极其重要的特征,可以认为,它们是仅次于ENSO的气候强信号之一。为了避免与赤道平流层QBO现象相混淆,作者特将本文中有关气象和气候要素变化中的QBO,称之为“广义QBO”(记为EQBO,下同),以区别于平流层QBO现象。不过,对于EQBO的研究尚需深入,例如对EQBO在长期气候变化中的影响和不同时期的各种特征(如振幅、频率、位相等)的研究,在气候系统的各个子系统中存在的EQBO及其形成机制的研究,还远远不够。

全球平均地面气温是气候变化的重要标志。虽然,以往苏联学者也曾对各种频率的气温变化作过分析,但毕竟其资料序列较短^[19],由于全球平均气温序列目前已有百年以上记录,而以往大多研究EQBO的一般特征和规律,很少对其频率的变化作多种分

析, 也很少研究其长期变化特征^[20,21]。本文目的则是, 从长期气候变化的意义上研究全球平均气温年际振荡的 EQBO 特征演变规律, 探讨全球气温序列中的 EQBO 信号的低频变率特征及其与大气环流、气候系统长期变率的关系。另一方面, 以往研究 QBO 或 EQBO, 通常采用功率谱分析或最大熵谱分析 (MESA), 一般只能分辨出序列中蕴含的平均周期信号, 而不能描述某一准周期振荡随时间的演变特征, 奇异谱分析 (SSA) 方法可弥补这一缺陷^[22,23], 并能分解重建原序列的各种准周期分量, 便于逐一研究各种准周期振荡的长期变率特征。尽管有人曾用 SSA 分析了北半球平均气温序列的准周期特征, 然而并未专门讨论 EQBO 及其长期变化规律^[23,24]。此外, 新近由作者提出的奇异交叉谱分析 (SCSA) 则可针对两个以上序列之间的耦合振荡, 描述其显著周期及其变化规律^[25], 这对揭示 EQBO 的影响因子和成因研究非常有益。

2 资料和方法

2.1 资料来源

原始资料选自 IPCC 公布的 1856~1997 年共 142 年全球及南北半球平均气温逐月序列, 并对其进行月标准化预处理, 以此作为基本研究对象; 另一方面, 利用同期北半球海平面气压场 (SLP) ($50^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 360^{\circ}\text{E}$) 的 $5^{\circ}\times 10^{\circ}$ 网格点逐月资料以及有关海域的 SST 月际序列, 作为基本参考对象。

2.2 趋势拟合方法

为了提取 EQBO 对气温序列必须消除长期趋势的影响, 关于趋势的确定有许多值得探讨的问题。而分析 QBO 或 EQBO 的长期变率则应考虑各种时变的谱分析方法。

从理论上说, 无论是全球或区域甚至局地的长期气候趋势, 借助于观测资料序列所作的估计, 都具有某种程度的不确定性, 作者另文作了详细讨论。一般认为, 对于长序列采用样条函数拟合趋势效果较好, 但实践证明, 这种方法比之普通多项式和经验函数拟合虽有较大改进, 其不确定性仍然较大。从本质上说, 样条函数仍是一种分段多项式拟合, 其关键在于如何选择分段数和分点位置, 对此, 尚无客观定量的标准, 尤其对于样本很大且波动曲折的记录序列, 要选取合适的分段数和分点位置, 必须进行大量试验, 这就需要花费很多机时和精力。而分段数和分点位置的选取不同, 其拟合效果有很大差异, 可见该方法稳定性较差, 易产生主观人为性, 这也正是其难点所在。图 1 所绘全球平均气温趋势就是一例, 图 1a 中的实线趋势为分段数 $k=5$ 的最佳拟合曲线 (其分点位置是经大量试验的结果), 若对分点位置稍作变动, 例如分别后移一个月 (见图 1a 虚线), 其趋势线竟出现了较大差异; 如若分段数取得不同, 则拟合曲线间的差异就更大, 图 1b 就是分段数取 $k=4$ 与 $k=5$ 之间的对比, 显然, 两者偏离比图 1a 大得多, 可见, 分段数取 $k=4$ 的拟合曲线对原序列的拟合效果比分段数取 $k=5$ 要差得多。为了克服样条插值函数拟合的这种不确定性, 本文采用 SSA 方法改进趋势拟合效果。

对全球及南北半球平均气温进行奇异谱分析 (SSA), 取嵌套维数 $m=100$, 其第一典型波型向量具有稳定的强方差贡献, 它的奇异谱值和前 8 项典型波型向量方差贡献如表 1。由表可见, 第一典型波型向量占总方差贡献的 50% 以上, 它的奇异谱值是第二

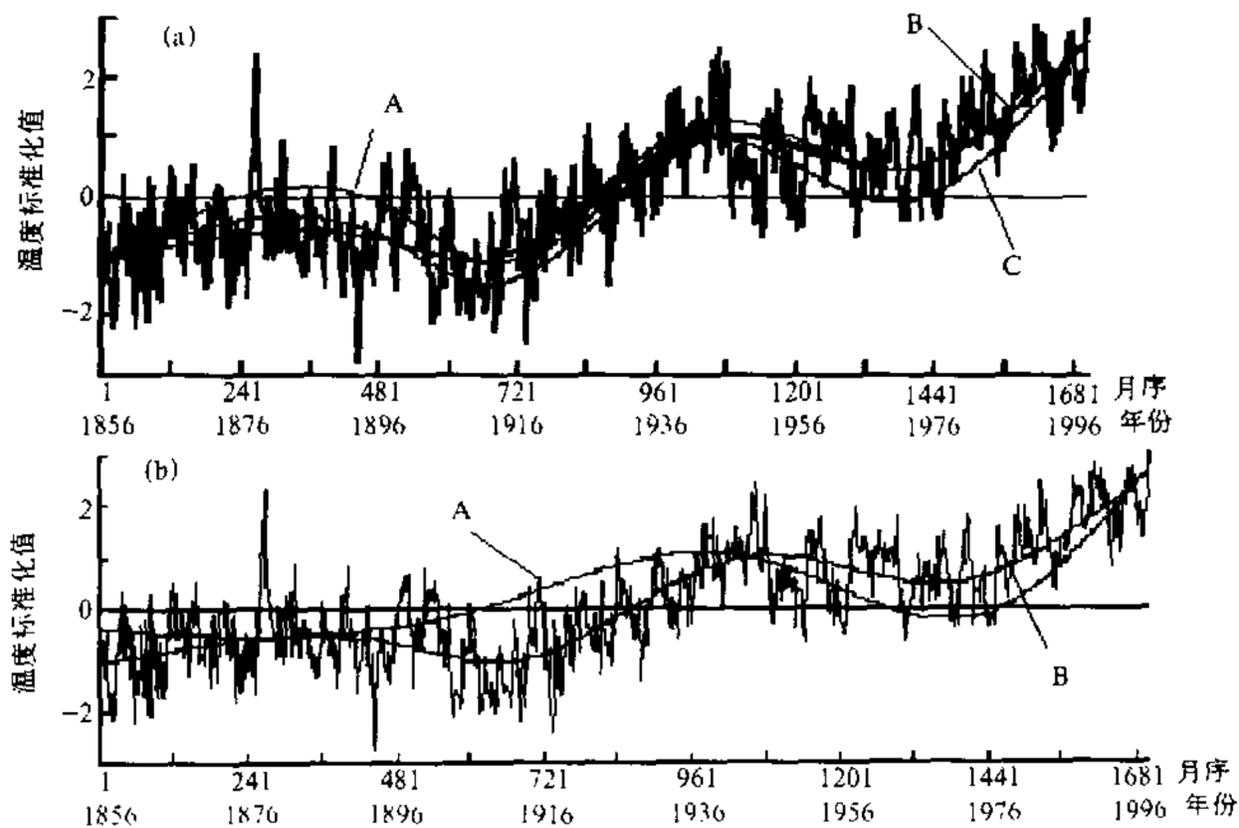


图1 样条插值函数对全球平均温度的趋势拟合

(a) 分段数 $k=5$, B线的分段点位置为 $n_0=1, n_1=505, n_2=651, n_3=1050, n_4=1375, n_5=1693$, A线的分段点位置为 $n_1 \rightarrow 506$, 其他分段点位置不动, C线的分段点位置为 $n_2 \rightarrow 652, n_3 \rightarrow 1051, n_4 \rightarrow 1376$, 其他分段点位置都不动; (b) A线分段数 $k=5$, B线分段数 $k=4$

表1 原始序列 SSA 的前 8 项奇异谱值和方差贡献

		1	2	3	4	5	6	7	8
全球平均气温	奇异谱值	55.5	4.50	4.08	3.04	2.14	1.52	1.18	0.91
	方差贡献	67.37	4.98	4.39	4.06	2.94	2.24	1.78	1.28
北半球平均气温	奇异谱值	42.61	5.48	4.98	3.43	2.31	2.01	1.95	1.91
	方差贡献	53.26	6.85	6.23	4.29	2.88	2.51	2.44	2.38
南半球平均气温	奇异谱值	59.97	4.06	3.28	3.17	2.37	1.62	1.07	0.77
	方差贡献	71.22	5.08	4.10	3.96	2.96	2.03	1.34	0.97

奇异谱值的 8 倍以上。特别是南半球, 其第一典型波型向量占总方差贡献的 71.22%。第一奇异谱值是第二奇异谱值的 14 倍多。

可见, 气温序列中的趋势项很强, 以 SSA 方法拟合的序列趋势, 具有客观、稳定和精度高的优点。图 2 就是嵌套维数 $m=100$ 时, SSA 的第一重建分量序列对全球及南北半球平均气温月际序列的趋势拟合, 显然拟合曲线较好地代表了序列的趋势走向。其客观性和稳定性表现在当嵌套维数 m 取不同值时, 拟合曲线之间的相关很高, 且差异很小。表 2 列出不同 m 对全球平均气温月际序列拟合趋势之间的相关, 它们都在 0.99 以上。而图 2c 所显示的不同 m 间的拟合曲线几乎重合。与图 1 对比, 其稳定性显而易见。对南北半球平均气温月际序列的拟合也具有同样的效果。相比之下, 样条插值函数拟合虽然其拟合曲线非常光滑, 走势也很漂亮, 但却有很大的人为性, 且稳定性差,

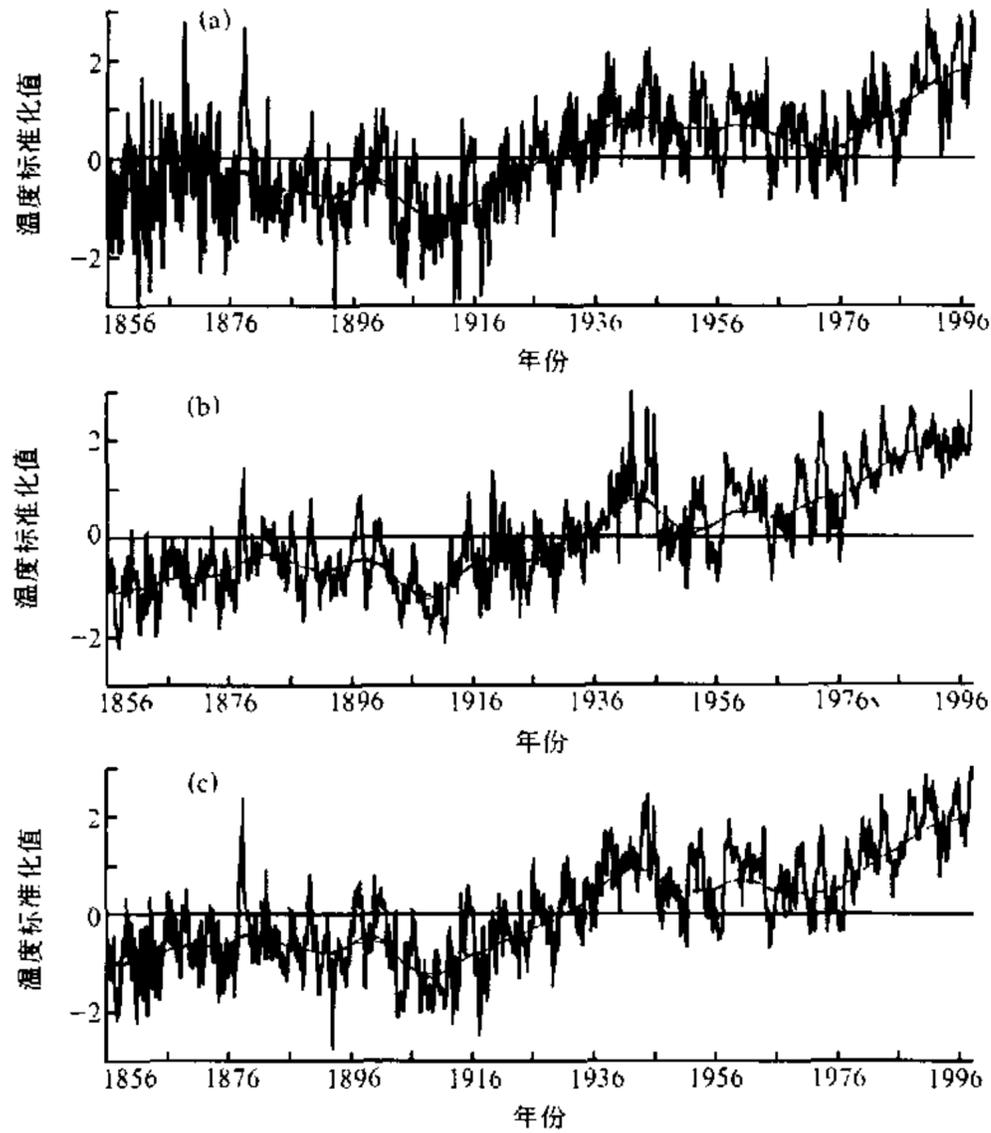


图2 SSA 的第一重建分量序列对原序列的趋势拟合 (嵌套维数 $m=100$)
 (a) 北半球平均温度; (b) 南半球平均温度; (c) 全球平均温度

表2 不同嵌套维数 m 对全球平均气温月际序列拟合之间的相关

M	80	90	100	110	120
80	1.00				
90	0.9997	1.00			
100	0.999	0.9997	1.00		
110	0.998	0.9991	0.9998	1.00	
120	0.9967	0.9982	0.9992	0.9998	1.00

拟合效果没有 SSA 方法好, 拟合最佳曲线很麻烦。因此, 用 SSA 方法寻求趋势项不失为一种简便而有效的方法。

2.3 EQBO 分量的提取方法

基于 SSA 方法趋势拟合相当稳定, 提取某种尺度的年际或年代际振荡分量可有两种方案, 其一, 按照对原标准化序列所作的 SSA, 考察其 EQBO 分量; 其二, 过滤趋势项后, 重新对滤波序列作 SSA。现以全球平均气温月际序列为例, 分别采用两种方案作 SSA。

表 3 即为前 9 个 (方案 1) 和前 8 个 (方案 2) 典型波型向量所占的方差贡献, 由表 3 可见, 两方案的方差贡献分布有很大的差异。方案 1 的第一典型波型向量占了近 2/3 的方差贡献, 其后的典型波型向量的方差贡献与第一典型波型向量相比都很小, 而方案 2 的典型波型向量所占的方差贡献由大到小依次缓慢地减小。文献[23]提出的识别时域上准周期信号的方法是计算两相邻时间主分量的后延相关系数 r_τ , 取其显著极大值 (且其相应主分量方差相近, 方差贡献率较大), 则其显著周期长度 $T = 4\tau$ 。根据这个原则, 由表 3 可见, 方案 1 是分别计算第二和第三、第四和第五、第六和第七以及第八和第九共 4 对时间主分量的后延相关, 而方案 2 是分别计算第一和第二、第三和第四、第五和第六以及第七和第八共 4 对时间主分量的后延相关, 它们的显著周期信号如表 4 所示。可见, 虽然两种方案的准周期信号有些差异, 方案 1 中的一些准周期信号被趋势所掩盖, 表现很弱, 但两种方案都显示出, 全球平均地面气温蕴含准两年周期振荡。但方案 2 的准两年周期振荡比方案 1 要显著得多, 不仅它所占的方差贡献比方案 1 大得多 (方案 1 仅占方差贡献的 6.44, 而方案 2 占总方差的 20.35%), 而且相邻时间主分量的后延相关也比方案 1 的要大得多。其实, 由表 4 可见, 方案 1 的相邻时间主分量的最大后延相关都比较小, 其最大的就是 24~28 月准两年振荡, 即原序列蕴含的准周期以准两年振荡最明显。可见准两年周期振荡是全球平均地面气温准周期性的一个重要特征。其他的准周期性都没有准两年的显著。虽然方案 2 中的最显著周期是 64~68 月 (5~6 年), 但其准两年振荡的后延相关比方案 1 的大, 因此后面我们着重分析方案 2 的准两年振荡特征。

表 3 两种方案的 SSA 前 9 个或 8 个典型波型向量的方差贡献

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
方差贡献 (1)	67.37	4.98	4.39	4.06	2.94	2.24	1.78	1.28	1.14
方差贡献 (2)	13.24	12.84	9.66	9.09	6.78	5.78	4.01	3.78	

表 4 两种方案识别的准周期信号 (括号内的数为两相邻时间主分量的最大后延相关)

	TC2,3	TC4,5	TC6,7	TC8,9
方案 1 的 τ (月)	24~26(-0.45)	11~12(0.45)	8~9(-0.65)	6~7(0.73)
	TC1,2	TC3,4	TC5,6	TC7,8
方案 2 的 τ (月)	16~17(-0.91)	13~14(-0.76)	8~9(0.78)	6~7(0.84)

3 准两年振荡的阶段性及其长期变化特征

3.1 准两年周期振幅的变化

图 3 为全球及南北半球 EQBO 重建分量序列, 显然, EQBO 的阶段性及长期变率显著, 其振幅、位相和波数随时间都有很大变化, 但各 EQBO 分量序列的变化特点却相差甚远。由图 3a 可见, 全球平均气温的 32~36 月振荡的振幅年代际变化特别显著, 其变化特点是: 序列的开始振幅最大, 第二年迅速减弱, 之后 10 年内振幅比较稳定, 1876 年后振幅逐渐增强, 直到 19 世纪末振幅都维持较强的水平, 其后振幅逐渐减弱,

直到 20 世纪 40 年代达到了最弱, 50 年代初振幅又开始增大, 1956 年直到 1982 年振幅基本不变, 而这一时期的振幅却小于 19 世纪后期。1983 年后振幅又很快减小, 直到 1996 年, 振幅都很小。从波包的观点来看, 32~36 个月的振幅随时间的变化在全序列中显示出二个半的波动, 平均波动的时间约为 57 年, 这 57 年中, 振幅维持较大的时间平均约为 32 年, 较小的时间约为 25 年。可见 32~36 月振荡的振幅年代际变化比较缓慢, 阶段性特征显著。与图 2 相比, 一个明显的特征是, EQBO 在两段振幅较大时期对应着气温的变化趋势平缓, 而两段振幅较小时期对应着气温具有较强的上升趋势。

图 3b 显示的 24~28 月准周期振荡振幅年代际变化的频率比 32~36 月的要快得多, 振幅的波包显示出 7 个波, 平均振幅波动的时间约为 18 年, 但振幅随时间变化并非均匀的, 平均约 12 年振幅较大, 6 年振幅较小。较大振幅的时期大致有: 1874~1882 年、1889~1895 年、1905~1914 年、1922~1933 年、1940~1945 年、1953~1966 年和 1972~1986 年。最后这段时期中又以 1972~1979 年的振幅为序列中最大的。较大振幅之间间隔着较小振幅的振荡或由大到小的过度时期。由图 3c 可见, 南半球气温 28~32 月振荡 (占方差贡献的 12.3%) 的振幅较大时期大致有: 1870~1880 年、1885~1894 年、1908~1931 年和 1974~1987 年, 较大振幅之间间隔着较小振幅的振荡, 特别是在 1932~1973 年间, 起初以负的振荡为主, 之后是正的振荡和负的振荡交替出现。图 3d 显示 24 月振荡 (方差贡献为 7.3%) 的振幅在最初的 4 年比较大, 之后直到 1907 年都较小, 振幅较大的时期还有: 1908~1921 年、1932~1946 年和 1954~1976 年, 整个序列的一个主要特征就是, 正的振荡为主与负的振荡为主交替进行, 它们之间约交替了 8 次。

北半球平均气温只有一对时间主分量具有 EQBO 现象 (占方差贡献的 10.9%), 如图 3e 所示, 该序列振荡的振幅随时间的演变特点是: 开始阶段振荡的振幅是整个序列最强的, 强振荡维持大约 14 年后迅速减弱, 直到振幅接近于零值, 其次振幅较强的时期有: 1888~1895 年和 1974~1979 年, 1896~1972 年振幅一直较小, 变化不大, 特别在 1935~1942 年和 1947~1951 年两个时期, 振幅非常小, 接近于零值, 整个序列振荡的振幅具有两头大中间小的特点。

综上所述, 全球及南北半球平均气温 EQBO 振幅的年际和年代际变化显著, 且随时间的演变特点各不相同。EQBO 在全球平均气温和南半球平均气温的准周期性中所占的方差贡献相差很小, 前者占 20.3%, 后者占 19.6%。北半球平均气温的 EQBO 方差贡献最小, 只有 10.9%, 其振幅随时间的变化表现出的规律性较差。三者间的差异也许是由于南北半球陆地和海洋面积所占的比例不同所引起。此外, 由图 2 和图 3a~e 不难发现三者的 EQBO 振幅变化有一个共同特点, 那就是在温度具有明显的上升期, EQBO 振幅都比较小, 即 EQBO 都比较弱。如全球及南北半球温度都具有明显上升趋势的 20 世纪 20 年代至 40 年代和 80 年代, EQBO 表现得都很弱。为了证实上述特征, 作者又对上述不同时期做功率谱分析, 结果表明 EQBO 振幅确有如此规律。

3.2 准两年振荡的位相变化

全球及南北半球平均气温的 EQBO 除了振幅具有阶段性及长期变化外, 其位相同样也具有变化。表 5 为各种 EQBO 相应的重建分量序列每隔 10 年序列的实际值, 该值的大小和相应的符号分别由 EQBO 的振幅和位相来决定。将表 5 和图 3 两者结合起来

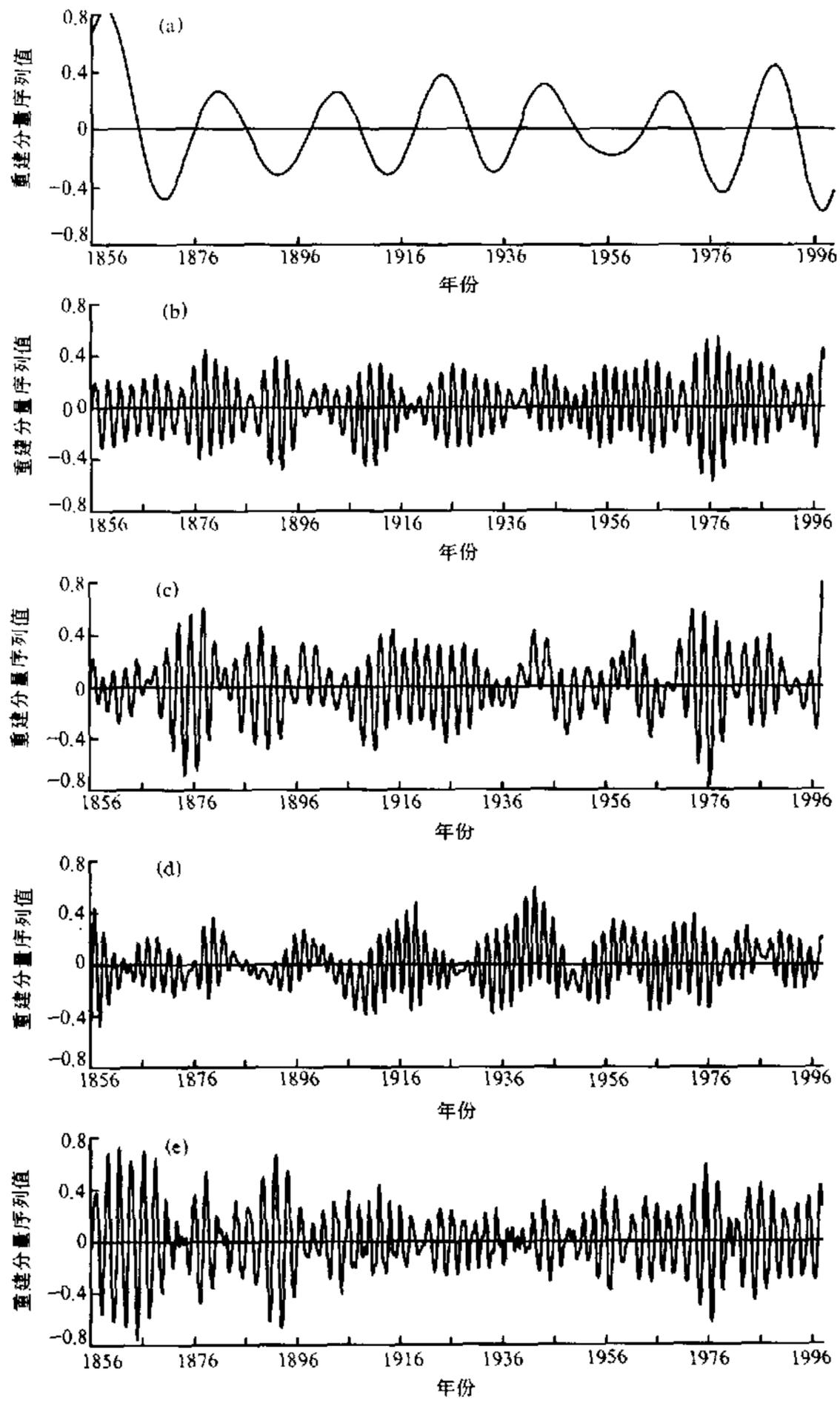


图3 EQBO 重建分量序列的长期变化特征

(a) 全球平均气温 RCS5+6; (b) 全球平均气温 RCS7+8; (c) 南半球平均气温 RCS5+6;
(d) 南半球平均气温 RCS7+8; (e) 北半球平均气温 RCS5+6

表 5 准两年周期振荡的重建分量序列每隔 10 年序列的实际值

时间	北半球		南半球		
	24~28 月	32~36 月	24~28 月	28~32 月	24 月
1856 年 1 月	-0.049	0.678	0.01	0.118	-0.431
1866 年 1 月	0.581	0.377	0.204	-0.06	-0.159
1876 年 1 月	0.346	0.147	0.278	0.031	0.026
1886 年 1 月	0.107	0.37	-0.007	0.095	0.037
1896 年 1 月	0.043	-0.379	0.208	-0.096	0.025
1906 年 1 月	0.364	0.286	0.104	-0.046	0.002
1916 年 1 月	0.269	0.107	0.137	-0.25	-0.002
1926 年 1 月	0.242	0.122	0.325	0.267	0.037
1936 年 1 月	-0.174	-0.187	-0.129	-0.147	-0.253
1946 年 1 月	0.230	-0.057	0.234	-0.224	0.148
1956 年 1 月	0.108	-0.139	0.055	-0.264	-0.085
1966 年 1 月	0.264	0.07	0.265	0.017	-0.127
1976 年 1 月	-0.114	-0.158	-0.315	-0.591	-0.333
1986 年 1 月	0.443	0.105	0.285	0.022	0.057
1996 年 1 月	-0.140	-0.188	-0.181	0.044	-0.08

分析, 就可进一步描述振荡位相随时间的演变特征。

由表 5 可见, 各准周期振荡的位相每隔 10 年有不同的变动, 最明显的就是正位相与负位相之间的转换, 如全球 32~36 月振动从 1886 年 1 月到 1896 年 1 月, 位相由正变为负, 10 年后又由负变到正, 1926 年 1 月到 1936 年 1 月, 位相由正变为负, 1956 年 1 月的位相是负的, 之后每隔 10 年位相在负和正之间转换, 而有时位相变化不大, 如最初的 1856 年 1 月处于正的位相, 30 年后的 1886 年 1 月仍处于正的位相。同样也可分析 20 年代际两个振荡位相的长期变化。如 1876 年 1 月~1936 年 1 月期间就发生了转换, 之后每隔 20 年其位相又变化很小了。24~28 月的振荡位相 20 年代际的变化特点与 32~36 月的有些不同。其初始位相直到 1916 年 1 月都是正的, 之后每隔 20 年发生了转换直到 1976 年 1 月, 而 1996 年 1 月的位相与 1976 年 1 月比较一致。

对比南半球平均气温的 EQBO 位相 (如表 5 所示), 每间隔 10 年, 有的变化较小, 有的变化较大。符号相反, 则位相必定不同, 即便符号一致, 位相也未必相同, 如 28~32 月振荡的 1876 年 1 月与 1886 年 1 月的振动值很接近, 但 1876 年 1 月后振动趋于减少, 而 1886 年 1 月后趋于增加, 故其位相不同。24 个月振荡也有类似情况。

由表 5 可见, 北半球平均气温的 EQBO 位相明显的年代际正负转换仅有 4~5 次, 如 1856 年 1 月到 1866 年 1 月, 1926 年 1 月到 1936 年 1 月, 1966 年 1 月以后每间隔 10 年振荡值符号就有一次变化。当然, 也有符号相同但位相不一致的情况, 如 1876 年 1 月与 1886 年 1 月和 1906 年 1 月与 1896 年 1 月等。

位相变化的实质, 乃是因为序列中显著振荡准周期并不只是某个单一频率所组成, 而是包含某一频段范围内的各个组成周期, 而且显著周期振荡还同时受到不显著周期或噪音的干扰。在不同时期, 由于各个组成周期的强弱不同, 因而表现出序列振荡的位相发生变化, 如果在一段时期, 各个组成周期的强弱对比变化很小, 则相应时期序列的位相也不会发生太大的变化。这种周期振动的不稳定性, 正是准周期的本质。

3.3 准两年振荡的波数（频率）变化

如前所述, EQBO 的振荡周期不是定值而是在一定的频率范围内变动。振荡周期的变化与振荡频率(波数)的变化是一致的。振荡频率快(波数多)表示振荡周期短, 否则振荡周期长。由表 6 可见, EQBO 序列的波数变化显著。全球平均温度 32~36 月振荡 10 年间平均波数为 3.43, 波数最多的是 3.75, 最少的是在 1946 年 1 月~1955 年 12 月只有 2.75 个波, 这一时期的振动最慢, 振荡周期最长, 两者相差一个周期的波动。24~28 月振荡波数随时间同样也具有变化, 波数最多为 5.25, 最少为 4, 两者相差 1.25 个波。该序列 10 年间平均波数约为 4.55。

表 6 准两年周期振荡 10 年间波数的变化

	全 球		南 半 球		北半球
	32~36 月	24~28 月	28~32 月	24 月	24~28 月
1856 年 1 月~1865 年 12 月	3	4.25	4.75	6	4.25
1866 年 1 月~1875 年 12 月	3.25	4	3.75	4.5	6
1876 年 1 月~1885 年 12 月	3.5	4.75	4.5	4.75	4.75
1886 年 1 月~1895 年 12 月	3.75	4.25	3.75	5.25	4
1896 年 1 月~1905 年 12 月	3.5	4	3.75	5.75	4.25
1906 年 1 月~1915 年 12 月	3.25	5	4.25	5.25	5
1916 年 1 月~1925 年 12 月	3.75	5	4.5	5.75	4
1926 年 1 月~1935 年 12 月	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5
1936 年 1 月~1945 年 12 月	3	4.5	4	5.75	6.5
1946 年 1 月~1955 年 12 月	2.75	5.25	4	5.25	4.25
1956 年 1 月~1965 年 12 月	3.5	4.75	4.75	5	3.75
1966 年 1 月~1975 年 12 月	3.75	4.5	4.25	5.25	4.25
1976 年 1 月~1985 年 12 月	3.5	4.5	3.75	5	4.75
1986 年 1 月~1995 年 12 月	3.5	4.5	4	5	4.25
平 均	3.43	4.55	4.18	5.21	4.6

由表 6 可见, 南半球平均气温的 28~32 月振荡的波数最多是 4.75, 最少是 3.75, 两者相差一个波。该序列 10 年间的平均波数为 4.18 (平均周期为 28.7 月), 即振荡周期偏向于 28 月。10 年波数的变化有多和少的循环, 也有连续 2 个或 3 个 10 年波数偏多或偏少。如 1886 年 1 月~1905 年 12 月间的波数就小于平均值, 1906 年 1 月~1935 年 12 月连续 3 年的波数就多于平均值等等。24 月振荡的平均波数为 5.21, 波数最多是 6, 最少是 4.5, 两者相差 1.5 个波。单一 24 月振荡在 10 年间的波数为 5, 实际序列中波数大于 5 的时段较多。这些时段振荡的频率较快, 较强振荡的周期短于 24 月。波数小于 5 的时段较少, 只有 3 个 10 年的波数是 5, 这 3 个 10 年的振荡周期是 24 月最强。

由表 6 可见, 北半球平均气温 10 年间 24~28 月的振荡波数相差最大, 变化最显著, 其平均波数为 4.6 (平均周期为 26 月), 其中以 1936 年 1 月~1945 年 12 月间的波数最多, 约为 6.5, 这期间相应的振幅是整个序列最小的, 振荡频率最快, 振荡周期最短仅为 18.5 月; 而在 1956 年 1 月~1965 年 12 月间振荡的波数最少, 仅有 3.75, 与波数最多的 6.5 相比差 2.75 个波。显然, 这期间振荡频率较慢, 其相应振荡周期正好是

32 个月, 与最短的振荡周期相差 13.5 月。即不同的 10 年间, 振荡周期在 18.5 到 32 月之间变动, 足见北半球平均气温的准两年振荡周期变化之大。

由以上分析可知, 全球及南北半球平均气温 EQBO 的波数 (频率) 年际和年代际变化显著, 且随时间的演变特点各不相同。北半球平均气温的 EQBO 波数变化最大。EQBO 波数的变化蕴含了 EQBO 周期随时间的波动。体现了 EQBO 周期的变化实质。在各不相同的时段, 波数的差异是由于其振荡周期的不同所引起。波数的变化反映了 EQBO 周期的演变特征。

4 全球气温 EQBO 与 Niño 区海温及气压场的耦合关系

如前所述, EQBO 是全球及南北半球平均气温的周期性变化中的一个重要特征。很多研究表明, 大气环流和地面气候要素的准两年振荡与平流层 QBO 有关, 而 El Niño 事件对平流层 QBO 演变有明显的影响。不过, El Niño 事件是通过怎样的物理机制影响平流层 QBO, 以及后者又是通过怎样的物理机制影响对流层大气环流和地面要素的准两年周期变化的, 都有待进一步研究。为此, 本文以北半球平均气温为例, 采用奇异交叉谱分析 (SCSA) 方法对地面气温的 EQBO 与北半球气压场特征及 Niño 区海温分别提取其耦合信号。试验表明, 北半球平均气温与平均气压场南北梯度 (如 50°N 与 20°N 的平均气压差) 的 EQBO 耦合振荡较强 (见表 7)。其耦合相关系数为 0.65 和 0.64, 而耦合振荡的协方差贡献占总协方差的 19.44%, 其他周期的耦合振荡都很弱。EQBO 耦合分量序列的变化如图 4 所示, 由图可见, 其年际及年代际变化特征显著, 19 世纪后期两者的耦合振荡最强, 20 世纪初最弱, 20 年代到 40 年代维持一较弱的水平, 50 和 60 年代耦合较强, 70 年代减弱后 80 年代又有所增强。两者耦合振荡位相正好相反, 表明当气压差位相为正值, 50°N 与 20°N 间的经向气压梯度大, 偏北气流强, 则气温降低而出现负位相; 相反, 当气压差的位相是负的, 表示偏北气流弱, 则气温上升而出现正的位相。耦合振荡的振幅值在有些时期两者并不一致, 这说明气温 EQBO 还受到其他因素的影响。

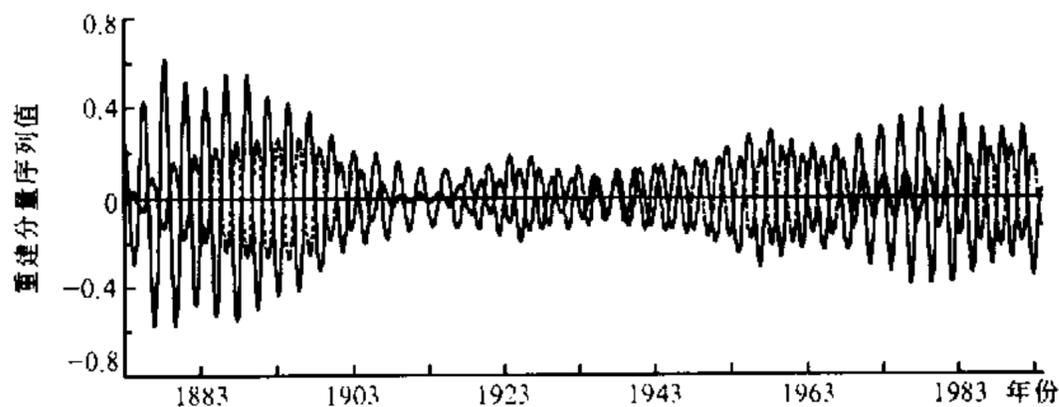


图 4 北半球平均气温 EQBO 与 50°N ~ 20°N 平均气压差之间的耦合振荡
实线: 北半球平均气温, 虚线: 50°N ~ 20°N 平均气压差

同理, SCSA 结果表明, 北半球平均气温与 Niño 区海温或南方涛动指数 (SOI) 具有较强的 EQBO 耦合振荡。如表 8 所示, 其耦合振荡协方差占总协方差的 49.0%,

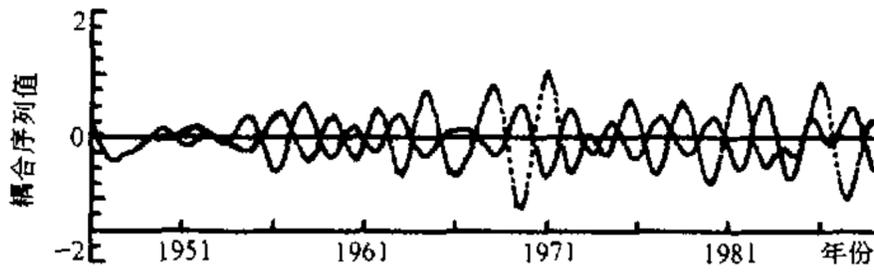


图 5 北半球平均气温 EQBO 与 Niño 区海温之间的耦合振荡
实线: 北半球平均气温, 虚线: Niño 区海温

耦合相关系数分别是 0.87、0.79 和 0.77, EQBO 耦合信号在 3 个耦合序列中都有所表现。其耦合分量序列的变化如图 5 所示, 可见, 两者间的 EQBO 耦合振荡振幅的年际和年代际变化基本是同步的。耦合振荡

在 50 年代很弱, 60 年代由强到弱, 70 年代是两头弱中间强, 80 年代由弱到强地变化。而耦合振荡的位相则相反, 这种反位相变化意味着 Niño 区海温异常升高时, 北半球平均温度降低, 否则, 北半球平均温度上升。

表 7 北半球平均气温与 50~20°N 气压差的耦合振荡信号

SCSA 序号	1	2	3	4	5	6
耦合相关系数	0.65	0.64	0.26	0.39	0.37	0.46
协方差贡献 (%)	9.78	9.66	8.69	8.13	8.0	6.83
显著耦合周期 (月)	28~32	28~32	-	-	-	-

表 8 北半球平均气温与 Niño 区海温的耦合振荡信号

SCSA 序号	1	2	3	4	5	6
耦合相关系数	0.89	0.87	0.79	0.77	0.62	0.63
协方差贡献 (%)	32.24	31.73	8.80	8.45	5.69	5.01
耦合周期 (月)	44	28~32	28~32	28~32	-	-

如上分析可见, 北半球平均气温的 QBO 受北半球气压场的南北气压梯度和 Niño 区海温的影响, 且后者的影响大于前者, 这些都是从实际资料得出的结果。其实, 地面气压场分布的异常使近地层热量水平输送异常可直接影响地面气温的变化, Niño 区海温异常可通过低纬区强烈的海气相互作用而影响全球大气环流, 从而间接地影响全球地面气温的变化。但是赤道平流层 QBO 是通过怎样的物理机制而影响地面气温的准两年周期振荡的, 至今尚不清楚, 这需从大气动力过程加以探讨和研究。不论怎样, 全球平均地面气温的 QBO 现象及其长期演变特征, 与地面气压场的分布即大气环流及热带海温异常的准两年周期振荡必定是密不可分的。

5 小结

(1) 对于长序列的趋势提取, 本文提出的在 SSA 分析基础上的第一重建分量序列作为趋势项的方法比样条插值函数法具有客观、稳定及拟合精度高的种种优点。

(2) 近 100 多年来, 全球及南北半球平均地面气温的变化存在着显著的 EQBO 现象。其振幅和位相的长期演变特征比较复杂且各具特色。其共同特点是, 在温度上升期, EQBO 现象都比较弱, 振幅较小, 有的振幅接近于零值。而位相和波数的变化则

体现了不同阶段 EQBO 振荡周期的低频变化。

(3) 北半球平均气温和 50°N 与 20°N 的气压差及 Niño 区海温有着较好的 QBO 耦合振荡关系, 它们的耦合振幅在年际和年代际变化中比较一致, 特别是与 Niño 区海温的耦合较强, 而耦合位相呈反相变化。它反映了北半球平均地面气温的 EQBO 与普遍存在于大气环流以及低纬海温的准两年周期性有一定关系。

参 考 文 献

- 1 Reed, R. J. et al., Evidence of the down ward-propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**, 813~818.
- 2 Landsberg, Helmut E., Biennial pulses in the atmosphere, *Beitrage zur Physik der Atmosphere*, 1962, **35**(3/4), 184~194.
- 3 Angell J. K., J. Korshover and G. F. cotton: Quasi-biennial oscillation in the "centers of action", *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**, 867~872.
- 4 Wagner, A. James, Long-period variations in seasonal sea-level pressure over the Northern Hemisphere, *Mon. Wea. Rev.*, 1971, **99**(1), 49~66.
- 5 Walsh, J. E. and A. Mosterk, A quantitative analysis of meteorological anomaly patterns over the United States, *Mon. Wea. Rev.*, 1980, **108**, 615~630.
- 6 Mooley, D. A. and B. Parthasarathy, Variability of the Indian summer monsoon and tropical circulation features, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**, 967~978.
- 7 Mukherjee, B. K., K. Indira, R. S. Reddy and BH. V. Ramana Murty, Quasi-biennial oscillation in stratosphere zonal wind and India Summer monsoon, *Mon. Wea. Rev.*, 1985, **113**, 1421~1424.
- 8 Barnett, T. P., Interaction of the Monsoon and Pacific Trade Wind system at interannual time scales, Part I: the equatorial zone, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**, 756~773.
- 9 Trenberth, K. E. and W-T. K. Shin, Quasi-Biennial fluctuations in sea level pressure over the Northern Hemisphere, *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**, 761~777.
- 10 Wang Shaowu and Zhao Zongci, Droughts and floods in China, 1470-1979, *Climate and History*, Cambridge University Press, 1981.
- 11 黄嘉佑, 准两年周期振荡在我国月降水量中的表现, *大气科学*, 1988, **12**(3), 267~273.
- 12 Yasunar, T., A possible link of the QBOs between the stratosphere, troposphere and sea surface temperature in the tropics, *J. Met. Soc. Japan*, 1989, **67**, 483~493.
- 13 Rasmusson, E. M., X. Wang and C. F. Ropelewski, The biennial component of ENSO variability, *J. Mar. Syst.*, 1990, **1**, 71~96.
- 14 Gray, W. M., Atlantic seasonal hurricane frequency, Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences, *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**, 1649~1668.
- 15 Shapiro, L., The relation of the QBO to Atlantic tropical storm activity, *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **17**, 1545~1552.
- 16 李崇银、龙振夏, 准两年振荡的演变及 El Niño / 南方涛动的影响, *科学通报*, 1990, **35**(17), 1313~1316.
- 17 李崇银等, 准两年振荡及其对东亚大气环流和气候的影响, *大气科学*, 1992, **16**(2), 167~176.
- 18 李崇银, 西太平洋副高活动与平流层 QBO 关系的研究, *大气科学*, 1997, **21**(6), 670~678.
- 19 叶笃正、曾庆存、郭裕福, 当代气候研究, 气象出版社, 1991, 186~233.
- 20 Vautard, R., Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series, *Nature*, 1991, **350**, 324~327.
- 21 Nitta, T. and J. Y. Oshimura, Trends and interannual and interdecadal variations of global land surface air temperature, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1993, **71**(3), 367~375.
- 22 Vautard, R., P. Yiou and M. Ghil, Singular spectrum analysis: A toolbit for short, noisy chaotic signals, *Physica D*, 1992, **58**, 95~126.
- 23 丁裕国、江志红, 奇异谱分析的广义性及其应用特色, *气象学报*, 1998, **56** (6), 736~743.
- 24 Plaut, G., R. Vautard, Spells of low frequency oscillation and weather regimes in the Northern Hemisphere, *J*

Atmos. Sci., 1994, 5(2), 210~236.

25 丁裕国、江志红、施能等, 奇异交叉谱分析及其在气候诊断中的应用, 大气科学, 1999, 23 (1), 91~99.

Quasi-Biennial Oscillation Variability in Interannual Variance of the Global Surface Temperature during the Last 100-Year Period

Ding Yuguo, Yu Jinghua and Shi Neng

(*Nanjing Meteorology College, Nanjing 210044*)

Abstract The singular spectrum analysis (SSA) and the singular cross-spectrum analysis (SCSA) are applied to the global, Southern and Northern Hemisphere surface temperature during 1856~1997. The results show that a striking quasi-biennial oscillations are found. And there are different coupled-oscillations between the quasi-biennial periods of the global surface temperature and the other climatic subsystem members, specifically SST over Niño oceanic regions and the sea-surface pressure series which represents the global atmospheric circulation subsystem. The quasi-biennial oscillation amplitude as well as its phase of the global average temperature has interdecadal variability and varies with various stage. The above-mentioned features are different obviously between the global temperature, the Southern Hemispheric temperature and the Northern Hemispheric temperature.

Key words: global average temperature; singular spectrum analysis; singular cross-spectrum analysis; quasi-biennial oscillation interdecadal variability