

海洋热含量对太阳总辐射11年周期变化的响应

王刚^{1, 2} 颜双喜³ 林敏³

(1 国家海洋局数据分析与应用重点实验室, 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061;

2 国家海洋局海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061;

3 中国海洋大学数学科学学院数学系, 青岛 266100)

摘要: 地球接收到的太阳总辐射 (TSI) 存在一个约11年的微小周期变化, 该变化可能对地球气候系统造成影响。众多研究表明, 局部海域海表面温度、海洋热含量的平均时间序列与TSI的11年周期变化有显著的相关性。但海洋对太阳辐射11年周期的响应并非空间均匀的, 响应机制也不确定。这里采用合成平均差方法, 根据太阳活动的高值年和低值年, 对美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和日本气象厅(JMA)的全球上700m热含量进行合成分析。两套数据产品得到的海洋热含量对太阳辐射的响应空间模态基本一致。在太平洋分别选取其中一个正响应区域和一个负响应区域, 发现这两个区域的上700m热含量确实存在较明显的11年周期变化。

关键词: 太阳总辐射, 海表面温度, 海洋热含量

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.04.003

Response of Ocean Heat Content to the 11-year Variation of Total Solar Irradiance

Wang Gang^{1, 2}, Yan Shuangxi³, Lin Min³

(1 Key Laboratory of Data Analysis and Applications (LDAA), the First Institute of Oceanography (FIO), State Oceanic

Administration (SOA), Qingdao 266061 2 Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling (MASNUM),

FIO, SOA, Qingdao 266061 3 Department of Mathematics, School of Mathematical Sciences, Ocean University of

China, Qingdao 266100)

Abstract: The total solar irradiance (TSI) impinging on the Earth has a slight variation of approximate 11-year period, which is expected to affect the variability of the Earth climate system. Researches have found correlations between sea surface temperature or ocean heat content of local ocean basins and the 11-year TSI time series. However, the response of the upper ocean to the 11-year solar cycle is not spatially uniform, and the response mechanism is still open to debate. No region has even been identified to have a clear 11-year variation in its sea surface temperature or ocean heat content yet. We analysed the ocean heat content (OHC) in upper-700-m of the global ocean from NOAA and JMA datasets, respectively. Composite mean difference method is used to obtain the response pattern of OHC to the 11-year solar activity. The two datasets give rather similar results. We select a positive response area and a negative one in the Pacific and find a significant 11-year variation in the upper 700-m OHC in these two regions.

Keywords: total solar irradiance (TSI), sea surface temperature (SST), ocean heat content (OHC)

1 引言

太阳辐射是地球气候系统的主要驱动力。太阳总辐射 (TSI) 指位于地球大气层之外一个标准地一日距离处的单位圆盘所接收到的太阳辐射通量。卫星观测时代开始之前, TSI的测量在地面进行, 科学家普遍认为它

是一个常量 (约 $1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), 因而也称其为“太阳常数”^[1-4]。只有少数科学家根据一些间接资料推测, TSI可能随太阳黑子等太阳活动而发生变化^[5]。有了卫星观测以后, TSI的观测精确度大大提升, TSI与太阳活动的密切关系也被逐渐证实。例如, TSI随太阳黑子数有一个11年左右的周期变化^[6-7], 太阳活动极大年 (峰年) 与太阳活动极小年 (谷年) 之间的TSI相差约 $1\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。通常所说的太阳活动周 (或太阳黑子周期) 就是指太阳活动 (太阳辐射和高能粒子等) 和表象 (黑子数、耀斑等) 的平均11年左右 (通常在9~13.6年之间) 的周期变化。此外, 在年代际尺度上, TSI还存在22年的Hale周期和80~90年的Gleissberg周期^[8]。根据TSI与太阳活动的关系, 天文学家可以重构上百年的TSI时间序列^[9-10]。

收稿日期: 2013年10月16日; 修回日期: 2014年3月10日

第一作者: 王刚 (1977—), Email: wangg@fio.org.cn

资助信息: 国家重大科学研究计划项目 (2012CB957803);

国家重点基础研究发展计划项目 (2011CB403502);

国家自然科学基金资助项目 (41006018, 41476024);

山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目

(BS2011HZ019)

Kopp等^[11]根据卫星观测数据将目前TSI的平均值修正到约 $1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

早在200多年前，Herschel^[12]就推测，太阳活动可能对地球气候系统产生影响。作为太阳活动的一个主要指标，TSI在年代至千年时间尺度上的变化都可能会影响到气候系统^[13-14]。在有卫星观测之前，Eddy^[5]就提出，TSI随黑子数变化的准10年周期可能对地球气候系统产生影响。Beer等^[15]采用一个非线性回归模型估计，1850—1990年的140年中，全球变暖约40%源于太阳辐射。Scafetta等^[16]以太阳—气候耦合模型估算，太阳对1900—2000年全球变暖的贡献率达到45%~50%，对1980—2000年全球变暖贡献率约为25%~35%。Gleiser等^[17]在低纬度和中纬度对流层的速度、热力变量中都发现了显著的太阳11年周期。Friis-Christensen等^[18]发现太阳黑子周期长度的变化与北半球气候距平时间序列有很高相关性，因而可以作为太阳活动与气候系统的一个相关指数。

海洋是地球气候系统的重要组成部分。本文主要探讨海洋热含量对TSI的11年周期的响应。第二部分，将回顾以往研究中给出的TSI的11年周期变化影响上层海洋温度的证据及可能的物理机制；第三部分，给出两个海洋热含量具有明显11年周期的海区，这两个海区可能是对TSI的11年周期具有显著响应的区域；第四部分是总结和展望。

2 海洋温度对太阳11年周期的响应

Reid^[19]发现，1985年之前130年的全球平均海表面温度（SST）异常与太阳黑子数的变化，在11年滑动平均之后具有非常一致的变化趋势。根据1980—1985年间TSI的变率以及130年的全球平均SST数据推测，SST可能与TSI的11年周期变化的包络（即80~90年的Gleissberg周期）具有相同的相位^[20]。Reid建立的海洋热结构模式计算表明，驱动海洋变化需要TSI约0.1%~1%的变化量。从而，TSI在一个太阳黑子周期内的变化幅度（约0.1%）可能会引起气候系统的变化^[20]。不过，也有研究认为其还不足以对气候造成显著影响^[15]。White等^[21]计算了1955—1991年共38年的全球平均SST异常的功率谱，发现各海盆和全球平均SST时间序列在9~13年以及18~25年的时间尺度上对TSI的变化有显著响应。1955—1996年间，全球海洋上层热含量也有8~15年及15~30年周期的显著变化，并与TSI的变化同步^[22]。曲维政等^[23]对1955—1999年间北太平洋中部400m深海洋温度的异常进行了功率谱分析，发现北太平洋中部和南太平洋中部海水温度具有明显11年周期。

上层海洋对太阳11年周期活动的响应在空间上也是分布不均的。通常采用合成平均差（Composite Mean Difference）方法，即根据上层海洋温度在太阳活动峰年（或高值年）和谷年（或低值年）的平均差，来确定海洋对太阳响应的空间结构。众多研究表明，太平洋SST中发现的太阳11年周期信号类似于ENSO信号。van Loon等^[24-25]给出太平洋SST对TSI的11年周期峰年的响应，发现热带北太平洋区域对TSI的11年周期的响应为La Niña型信号，即在太阳活动峰年，热带西、中太平洋SST异常偏暖，而热带东太平洋异常偏冷。Meehl等^[26-27]在热带太平洋的SST时间序列中发现了类似的强La Niña型冷信号。然而White等^[21-22]、Tung等^[28]以及Roy等^[29]则在同一区域发现了弱El Niño型的暖信号。不同学者得到的海洋对TSI的11年周期响应的空间分布在相位上的差异，可能是他们采用不同的数据滤波方法造成的^[25, 30]；也有可能太阳对海洋的影响并不显著，因而被ENSO信号所掩盖^[31]。

在地球表面监测TSI的11年周期变化对气候系统的影响并不容易，这一方面是由于TSI本身的变化非常小，另一方面是由于近些年来温室气体、火山、气溶胶等的变化对气候系统的影响更加显著，很难从中分离出太阳的影响。太阳活动影响地球气候系统的观测证据，似乎都只能从时间序列的统计特征来证明它们的相关性，因而受到一些学者的质疑^[32]。此外，从能量角度来说，TSI的11年周期变化只能使全球平均SST产生约0.1K的变化，这与观测（至少是局部观测）所显示的太阳11年尺度的气候变化的量值相差较大。一种可能的解释是，太阳与地球气候系统存在一个复杂的相互作用机制，使得地球表面只有局部地区对TSI的11年周期变化有显著响应^[33]。

学者们所提出的太阳对气候系统的影响机制大致可以分为两类：一是太阳通过高能粒子的调制作用对气候系统产生影响^[34]；二是TSI的变化直接作用于气候系统^[35]。无论是高能粒子还是TSI本身，它们的变化对气候系统造成的影响都非常小，但是其长期累积效应或者非线性效应导致的放大反馈过程可能会对气候系统起到明显作用。

太阳通过高能粒子的调制作用对气候系统的影响主要是在高纬大气中引发化学反应，进而作用到气候系统。目前尚未有高能粒子直接影响海洋温度的研究和报道。TSI直接作用机制包括由底至上机制（海洋吸收太阳辐射，然后传递到大气中）和自顶向下机制（大气对太阳辐射的响应驱动了海洋的响应）。由底

至上机制主要强调海洋的热吸收能力。海洋热容量巨大，因而其直接吸收TSI造成的长期累积效应可能会比较显著^[36]。Meehl等^[26]提出由底至上机制解释了热带太平洋SST对TSI的11年周期响应的La Niña型空间结构形成过程(图1)：太阳活动峰年时，热带太平洋东部无云区海表面接收到的太阳辐射增加(图1a)，从而增加了海洋的感热通量；蒸发导致大气中的水汽增多，更多的水汽随着信风被输送到中西太平洋多云区，加强了降水量和向对太阳辐射的反射(图1b)；东太平洋无云区大气沉降的增强，使得云量进一步减少，然后导致更强的信风和更强的赤道辐合带(图1c)。海气相互作用过程使得太阳辐射在太平洋

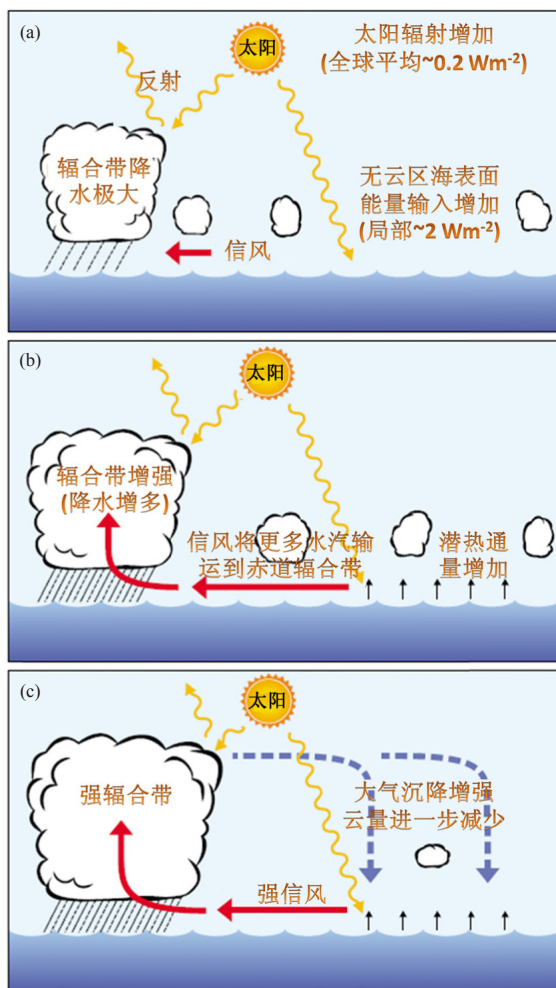


图1 热带太平洋SST对太阳辐射11年周期响应的机制 (a) 全球平均太阳辐射增加 $0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 即可使东太平洋无云区增加约 $2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的热通量；(b) 无云区海面温度的增加导致海洋潜热通量增加，大气中的水汽增多。信风将更多的水汽带到西太平洋的赤道辐合带，从而辐合带云量增加，太阳辐射反射增强且降水增多，海表面温度反而降低；(c) 随着东部大气沉降的增强，无云区云量进一步减少，海面接收到的太阳辐射进一步增强，导致更强的信风和赤道辐合带(据Meehl等^[26]改编)

东部增加而西部较少。自顶向下机制则主要来解释太阳辐射的紫外部分如何通过同温层自上而下影响气候系统。White^[35]对海洋SST和热含量等的热收支的诊断认为，SST中的11年周期信号不能仅仅以由底至上机制来解释，TSI中的紫外辐射部分通过大气同温层自顶向下影响气候系统的作用也可能存在。Misios等^[37]的数值模拟实验也说明，大气对TSI的11年周期的响应驱动了热带太平洋中该尺度的信号，并通过海—气反馈过程放大。热带和副热带海区可能同时存在由底至上和自顶向下两种响应机制^[30]。

3 海洋热含量对TSI的11年周期的响应

目前关于海洋对太阳11年周期的响应研究，大致有如下3种方法：一是根据海洋观测数据计算局部海区(海盆或更大尺度)平均温度(SST或海洋热含量等)的时间序列和太阳活动(TSI或黑子数)时间序列的相关性；二是通过对海洋观测数据的合成平均或合成平均差来确定海洋对太阳11年周期响应的空间分布；三是采用海—气耦合模式，在模式中改变与太阳活动有关的参数来做敏感性试验，从而推测海洋对太阳11年周期的响应过程和机制。

本研究探讨了海洋热含量(如果没有特别说明，海洋热含量就是指海洋热含量异常)与TSI的11年周期的关系。TSI数据基于Wang等^[38]的通量传输模型模拟得到(<http://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/tsi-data/>)，然后进行平移，以便和Kopp等^[11]校正后的TSI观测值衔接。海洋热含量采用源自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和日本气象厅(JMA)的共两套数据。NOAA数据由Levitus等^[39]基于WOD09构建，该数据集提供全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点海洋热含量数据，时间从1955—2011年，包括季节平均、年平均和5年平均，垂向包括0~700m和0~2000m两个水深。本文采用的是0~700m层的5年平均数据。JMA数据由Ishii等^[40]基于WOD05构建，空间分辨率也是 $1^\circ \times 1^\circ$ ，时间从1950—2011年，该数据为年平均数据。为与NOAA数据保持一致，我们对JMA数据进行了5年滑动平均。

首先，根据TSI的量值(图2)将1955—2012年这段时间分为太阳活动高值年和太阳活动低值年两类。前者为包括太阳活动峰年在内的TSI的11年周期中辐射值较高的年份(大约5年)，后者为包括太阳活动谷年在内的TSI的11年周期中辐射值较低的年份。我们注意到，如果以一个常数(如1955—2012年的TSI平均值，图2蓝线)来划分高值年和低值年，可能会造成一个太阳黑子周期内有多个高值年时段或多个低值年时段的情况(如1965—1976年间，1971年为低值

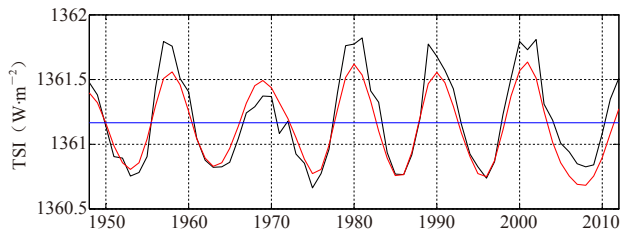


图2 年平均TSI (黑线) 以及它的11年周期的EMD分量 (红线)。图中高于1955—2012年的TSI平均值 (蓝线) 的EMD分量所对应的年份为太阳活动高值年, 其余为太阳活动低值年

年, 而1970年和1972年为高值年)。为此, 本文采用经验正交分解 (EMD) 方法, 提取TSI中的11年周期的本征模态函数, 以此模态代替TSI来确定高值年和低值年: 高于平均TSI的EMD分量所对应的年份为太阳活动高值年, 其余年份为太阳活动低值年。在做EMD分解时, 为了减小EMD分解中边界效应所引起的误差, 选取的时间段从1947年开始。在做合成平均差时, 实际时段根据海洋热含量的时段截取。

太阳活动高值年和低值年确定之后, 我们采用合成平均差 (将海洋中每个点的0~700m热含量按照太阳活动高值年和低值年分为两组, 然后计算两组的平均值之差) 来确定海洋热含量对太阳活动的响应。图3是两套热含量数据得到的热含量对太阳11年周期响应的空间模态。

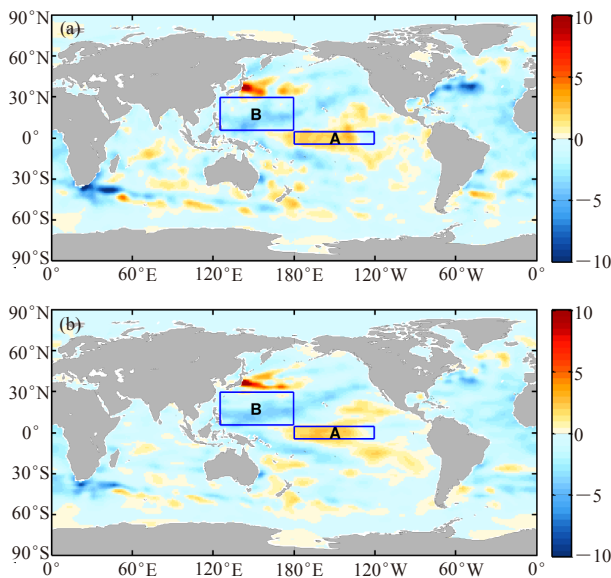


图3 合成平均差得到的0~700m全球海洋热含量对太阳11年周期的响应模态。(a)和(b)分别是NOAA和JMA数据得到的结果。如果某个点的海洋热含量具有与TSI同相位的11年周期振荡, 则该点表现为暖色调; 反之, 如果某点的海洋热含量具有与TSI反相位的11年周期振荡, 则该点在表现为冷色调。矩形区域A和B对应着太平洋海洋热含量对TSI正响应显著和负响应显著的两个区域

很明显, TSI的11年周期只是图3中空间各点热含量对太阳辐射响应为正或负的充分条件, 而不是必要条件。换言之, 图3中为正响应的点, 其热含量未必具有与TSI同相位的11年周期振荡; 同样, 负响应的点也未必具有与TSI反相位的11年周期振荡。为此, 我们在热带太平洋选择两个海洋热含量对TSI响应比较显著的海区, 来进一步观察其是否具有11年周期振荡。图3中A区域和B区域分别对应太平洋海洋热含量对TSI正响应或负响应比较显著的两个区域。图4和图5分别给出这两个区域经向 (子午向) 平均海洋热含量随时间的变化。在NOAA数据 (图4a) 和JMA数据 (图4b) 中, A区域的海洋热含量都表现出明显的准10年振荡。B区域的海洋热含量在1980年代之后表现出明显的准10年周期振荡。如果认为1980年左右存在一个冷相位 (图5a中比较明显, 图5b中则不明显), 则从1950年代至2011年会出现一个连续的10年周期振荡。这个冷相位的弱化或缺失, 可能与1975年左右热带太平洋的稳态转换 (regime shift)^[41]有关。以Levitus数据为例, 我们对这两个区域进行了小波分析。功率谱 (图6) 显示, 两个区域的平均热含量都在11年左右周期上有明显谱峰, 并通过了红噪声95%的置信度检验。对于A区域 (图6a), 11年周期为最显著周期; 对于B区域 (图6b), 25年左右周期最显著, 11年周期次之。

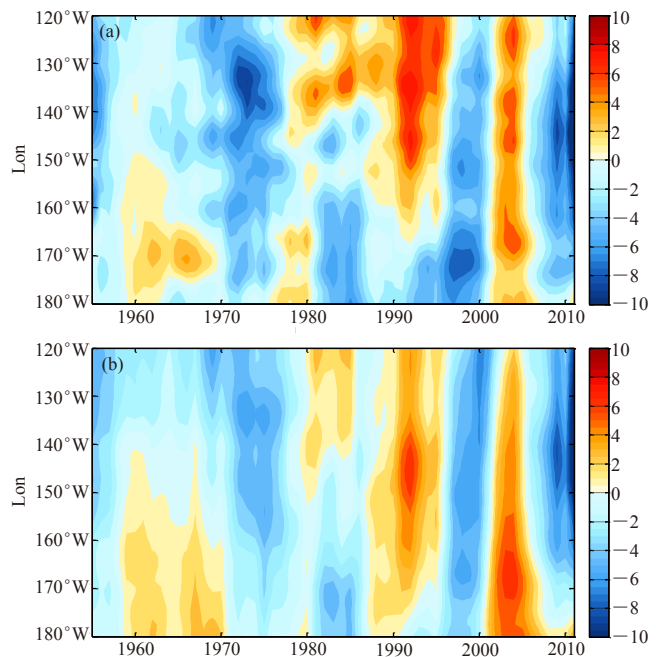


图4 赤道中太平洋 (图3中A区域) 海洋热含量随时间的变化。海洋热含量具有明显的11年周期振荡, 且与太阳11年周期信号同相位。(a)和(b)分别是NOAA和JMA数据得到的结果

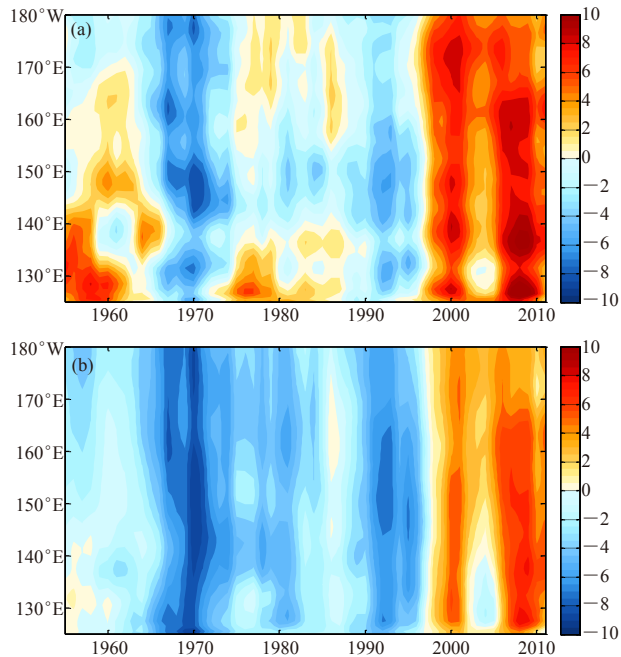


图5 西太平洋暖池（图3中B区域）海洋热含量随时间的变化。海洋热含量具有明显的11年周期振荡，且与太阳11年周期信号反相位。（a）和（b）分别是NOAA和JMA数据得到的结果

然后，采用一个简单的办法对图3中给出的海洋热含量对TSI的响应模态做显著性检验。1955—2012年间，TSI大致经历了5个黑子周期，这里将其分为9段（每段长度为一个太阳黑子周期，相邻两段有半个周期的重叠），在每段时间采用合成平均差做海洋热含量的响应投影。若某点海洋热含量对TSI的9段响应中同为正或同为负的出现7次以上，则认为该点的海洋热含量对TSI的11年周期响应是显著的。结果显示，图3中A区域的大部分格点上对TSI的11年周期的响应是显著的，而B区域的显著响应区域集中在该区域颜色较深的位置（图略）。这也解释了为何图5中B区域的11年周期不如图4中A区域的11年周期明显。

此外，在黑潮、湾流以及阿加勒斯海流这几个西边界流的延伸区，也分别看到了热含量对太阳11年周期的显著响应。其中，黑潮延伸区为显著的正响应，后两者为负响应。这些区域的海洋热含量变化对局地气候系统都有重要影响。

4 总结与展望

太阳是地球气候系统的主要能量来源。太阳活动必然会影响到地球气候系统。然而，太阳总辐射在一个黑子周期（11年）内的微小变化是否能够显著影响到地球气候系统，还存在广泛争议。目前已有的观测只能证明，在大气和海洋的某些区域，存在与TSI

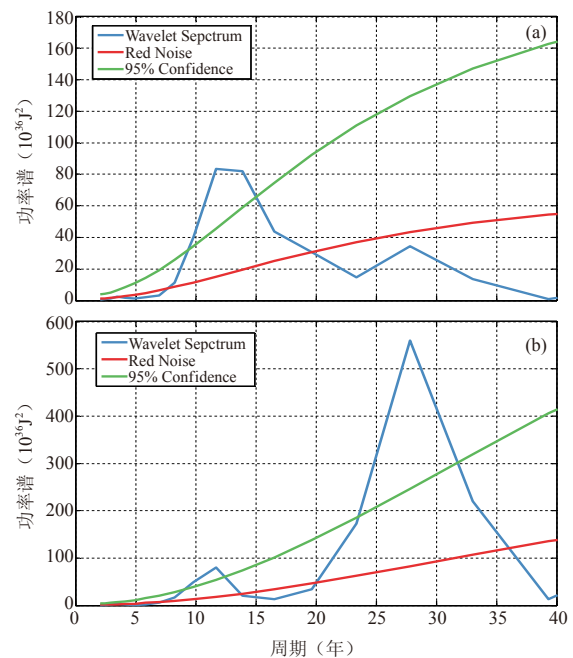


图6 (a) 赤道中太平洋（图3中A区域）和（b）西太平洋暖池（图3中B区域）区域平均热含量的小波谱（蓝线）。两者在11年左右的周期上都通过了红噪声（红线）95%置信度（绿线）的检验

的11年周期相关的周期信号。时间序列的相关性无法解释TSI的微小能量变化如何引起地球气候系统（局部）地区显著的11年振荡的问题。TSI信号通过非线性作用在气候系统中的放大过程，还需要复杂的太阳—气候系统的相互作用机制来解释。目前数值模式在机制分析上起重要作用，理论证明还需要进一步发展。

我们近期的工作从海洋热含量对TSI响应的空间模态中挑选了两个响应显著的区域。在这两个区域中，我们看到海洋热含量具有明显的准10年周期振荡。Hasegawa等^[42]曾在热带太平洋的海洋热含量中发现了13年的振荡信号，并认为它和ENSO事件有关。与他们发现的信号不同的是，我们给出的准10年信号周期更接近太阳11年周期，并且没有发现明显的东西向传播现象，因而可能是不同的信号。考虑到得到该信号的过程，我们认为，它是海洋热含量对TSI的11年周期的响应。此外，黑潮、湾流、阿加勒斯海流这几个对区域气候影响显著的西边界流，它们延伸区的海洋热含量对TSI的11年周期的响应也很显著，只是相位上有所不同。不同海区对TSI响应的强度或相位上的差异，可能是海—气非线性相互作用的结果，也可能是海洋本身动力过程的结果，响应过程及作用机理有待深入探讨。

参考文献

- [1] Johnson F S. The solar constant. *J Meteor*, 1954, 11: 431-439.
- [2] Drummond A J, Hickey J R, Scholes W J, et al. New value for the solar constant of radiation. *Nature*, 1968, 218: 259-261.
- [3] Thekaekara M P, Drummond A J. Standard values for the solar constant and its spectral components. *Nature*, 1971, 229: 6-9.
- [4] Laue E G, Drummond A J. Solar constant: First direct measurements. *Science*, 1968, 161(3844): 888-891.
- [5] Eddy J A. The Maunder minimum. *Science*, 1976, 192(4245): 1189-1202.
- [6] Kuhn J R, Libbrecht K G, Dicke R H. The surface temperature of the Sun and changes in the solar constant. *Science*, 1988, 242(4880): 908-911.
- [7] Willson R C, Hudson H S. The Sun's luminosity over a complete solar cycle. *Nature*, 1991, 351(42): 42-44.
- [8] Tsiropoula G. Signatures of solar activity variability in meteorological parameters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, 65: 469-482.
- [9] Lean J. Evolution of the Sun's spectral irradiance since the Maunder Minimum. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(16): 2425-2428.
- [10] Hoyt D V, Schatten K H. A discussion of plausible solar irradiance variations, 1700-1992. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(A11): 18895-18906.
- [11] Kopp G, Lean J L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L01706.
- [12] Herschel W. Observations tending to investigate the nature of the Sun, in order to find the causes or symptoms of its variable emission of light and heat: With remarks on the use that may possibly be drawn from solar observations. *Philos Trans R Soc London*, 1801, 91: 265-318.
- [13] Njau E C. Sun-weather/climate relationships: A review—Part II. *PINSA*, 2000, 66,A(5): 451-466.
- [14] Njau E C. Sun-weather/climate relationships: A review—Part I. *PINSA*, 2000, 66,A(3&4): 415-441.
- [15] Beer J, Mende W, Stellmacher R. The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 403-415.
- [16] Scafetta N, West B J. Phenomenological solar contribution to the 1900—2000 global surface warming. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L05708.
- [17] Gleisner H, Thejll P. Patterns of tropospheric response to solar variability. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13): 1711.
- [18] Friis-Christensen E, Lassen K. Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, 1991, 254: 698-700.
- [19] Reid G C. Influence of solar variability on global sea surface temperatures. *Nature*, 1987, 329: 142-143.
- [20] Reid G C. Solar total irradiance variations and the global sea surface temperature record. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(D2): 2835-2844.
- [21] White W B, Lean J, Cayan D R, et al. Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C2): 3255-3266.
- [22] White W B, Cayan D R, Lean J. Global upper ocean heat storage response to radiative forcing from changing solar irradiance and increasing greenhouse gas/aerosol concentrations. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C10): 21355-21366.
- [23] 曲维政, 邓声贵, 黄菲, 等. 深海温度变化对太阳活动的响应. 第四纪研究, 2004, (3): 285-292.
- [24] van Loon H, Meehl G A, Shea D J. Coupled air sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter. *J Geophys Res*, 2007, 112(D2): D02108.
- [25] van Loon H, Meehl G A. The response in the Pacific to the Sun's decadal peaks and contrasts to cold events in the Southern Oscillation. *J Atmos Sol-Terr Phys*, 2008, 70: 1046-1055.
- [26] Meehl G A, Arblaster J M, Branstator G, et al. A coupled air-sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region. *J Climate*, 2008, 21: 2883-2897.
- [27] Meehl G A, Arblaster J M. A lagged warm event-like response to peaks in solar forcing in the Pacific region. *J Climate*, 2009, 22: 3647-3660.
- [28] Tung K K, Zhou J S. The Pacific's response to surface heating in 130 yr of SST: La Niña-like or El Niño-like? *J Atmos Sci*, 2010, 67: 2649-2657.
- [29] Roy I, Haigh J D. Solar cycle signals in sea level pressure and sea surface temperature. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10: 3147-3153.
- [30] Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, et al. Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing. *Science*, 2009, 325: 1114-1118.
- [31] Roy I, Haigh J D. Solar cycle signals in the Pacific and the issue of timings. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69: 1446-1451.
- [32] Legras B, Mestre O, Bard E, et al. A critical look at solar-climate relationships from long temperature series. *Clim Past*, 2010, 6: 745-758.
- [33] Christoforou P, Hameed S. Solar cycle and the Pacific "centers of action". *Geophys Res Lett*, 1997, 24(3): 293-296.
- [34] Dickinson R E. Solar variability and the lower atmosphere. *Bull Am Meteorol Soc*, 1975, 56: 1240-1248.
- [35] White W B. Response of tropical global ocean temperature to the Sun's quasi-decadal UV radiative forcing of the stratosphere. *J Geophys Res*, 2006, 111: C09020.
- [36] Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48: RG4001.
- [37] Misios S, Schmidt H. Mechanisms involved in the amplification of the 11-yr solar cycle signal in the tropical Pacific Ocean. *Journal of Climate*, 2012, 25: 5102-5118.
- [38] Wang Y M, Lean J L, Sheeley J N R. Modeling the Sun's Magnetic Field and Irradiance since 1713. *The Astrophysical Journal*, 2005, 625: 522-538.
- [39] Levitus S, Antonov J I, Boyer T P, et al. World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L10603.
- [40] Ishii M, Kimoto M. Reevaluation of historical ocean heat content variations with timevarying XBT and MBT depth bias corrections. *J Oceanogr*, 2009, 65: 287- 299.
- [41] Stephens C, Levitus S, Antonov J, et al. On the Pacific Ocean regime shift. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(19): 3721-3724.
- [42] Hasegawa T, Hanawa K. Decadal-scale variability of upper ocean heat content in the tropical Pacific. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(6): 1272.