

文章编号: 2096-1618(2019)05-0525-07

太阳总辐照度对热带中太平洋海表温度年代际变化的可能影响

梁 健¹, 任宏利², 陈权亮¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室 CMA-NJU 气候预测研究联合实验室, 北京 100081)

摘要:为研究分析热带太平洋海表温度(SST)年代际变化对太阳辐射响应,利用 SST 资料、20 世纪再分析资料 and 第六次耦合模式比较计划(CMIP6)所提供的太阳总辐照度(TSI)数据,采用线性回归的方法对 TSI 对热带太平洋 SST 年代际变化的可能影响进行了诊断研究。结果表明,热带中太平洋 SST 存在与 TSI 类似的准 11 年周期变化信号,TSI 与 SST 以及其他海气变量之间存在显著相关关系。SST 异常在滞后于 TSI 信号 1~3 年时的正相关达到最强,证实了热带中太平洋海表温度可能存在对 TSI 信号的滞后响应。进一步分析表明,由 TSI 所直接引起的海表净短波辐射变化可能是热带中太平洋 SST 在年代际尺度上变化的直接原因。海表温度的年代际异常可以通过海气相互作用引起表层纬向风的变化,并反过来增强 SST 的年代际变化信号。TSI 正位相引起的 SST 正异常可促使对流层温度上升、空气中的水汽增加、上升运动加强等相应变化,进而使得总云量增加,因此滞后 2~3 年后可能会由于云-辐射反馈而引起进入海洋净短波辐射量的减少。

关键词:气象学;气候动力学;太阳辐射;年代际变化;热带中太平洋;海温;太阳总辐照度

中图分类号:P461⁺.1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcui.2019.05.014

0 引言

大气和海洋环流运动的基本能量来源是太阳辐射,观测数据显示太阳辐射存在比较规律的 11 年周期变化^[1-2]。太阳活动过程中 TSI 的变化,影响着进入地球气候系统的总能量。在一个 11 年的太阳活动周期内,其辐射强度的变化会对气候系统产生一定的影响^[3-6]。尽管太阳辐射对气候如此重要,但目前对太阳辐射影响气候系统的机制理解仍然不十分清楚^[7-10]。

海洋作为气候系统的重要组成部分,在调节气候变化和变率中发挥着重要作用^[11-12]。最近研究发现热带太平洋海气系统是太阳辐射信号影响的敏感区域之一^[13-15]。热带中太平洋地区 SST 的年代际变化对气候变化有很强的影响^[16]。从图 1 可以看到,TSI 和热带中太平洋 SST 都具有显著的准 11 年周期信号。由于对热带太平洋 SST 年代际信号进行研究的统计方法不同,太阳辐射影响热带太平洋 SST 可能出现不同的表现形式。Zhou 等^[17]使用合成平均差(CMD)方法,显示了中东太平洋 SST 对太阳辐射变化存在高置

信水平的响应。Wang 等^[18]研究发现中太平洋海洋热含量异常存在明显的准 10 年变率。vanLoon 等^[13]用太阳黑子峰值年合成的方法发现赤道中东太平洋 SST 对太阳辐射的响应表现出 SST 负异常,这可能是由于所选取的太阳辐射峰值年中存在厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)现象的冷位相年,并用模式进行了验证^[19]。White 等^[2]对深海温度数据进行滤波处理发现了与太阳辐射同位相的热带太平洋厄尔尼诺型的 SST 分布。Roy 等^[20]使用多元线性回归方法发现热带东太平洋 SST 对太阳辐射存在弱的 SST 暖异常响应。Kodera^[21]通过平流层-对流层相互作用和经圈-纬圈环流解释了太阳辐射对热带东太平洋 SST 异常的影响。Misios 等^[22]使用大气-海洋耦合模式的数值模拟,发现赤道太平洋 SST 年代际变化与太阳辐射变化近似同位相。

研究表明,热带中太平洋 SST 异常中存在与太阳辐射 11 年周期变化类似的信号,但目前热带中太平洋 SST 对于太阳辐射的响应模态还没有明确的结论^[20]。旨在利用 TSI 数据来表征太阳辐射的变化,诊断分析太阳辐射对热带中太平洋海表温度的可能影响。由于海洋的巨大热惯性,SST 对太阳辐射的响应常常呈现出滞后性^[2,12],因此侧重诊断分析太阳辐射对热带中太平洋 SST 影响的滞后效应,并全面分析 TSI 与热带

收稿日期:2019-02-21

基金项目:国家重点研发资助项目(2018YFC1506004);国家自然科学基金资助项目(41575091,41606019,41605116);中国气象局公益专项研究基金资助项目(GYHY201506013)

中太平洋各气候变量的关系,包括与 SST、海平面气压 (SLP)、表面风场、垂直速度、气温、总云量和地表辐射通量的相关关系。

1 资料与方法

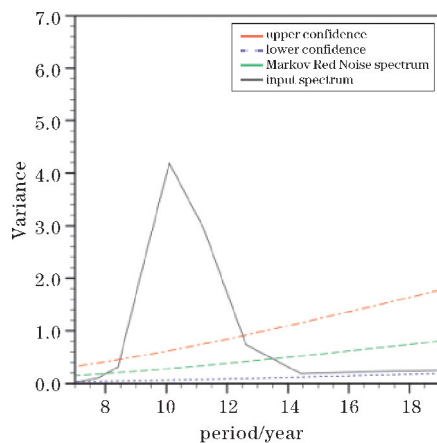
使用的表征太阳辐射强度的物理量是 TSI。由于 TSI 的直接观测是从 1978 年卫星仪器出现才开始。因此,为了评估长期 TSI 对热带中太平洋的影响,就需要利用其他表征太阳辐射的量去估计 TSI 随时间的变化,进而得到更长时间序列。CMIP6 的太阳辐射强迫数据主要包括了 TSI、F10.7 (F10.7 cm 太阳射电通量) 和 SSI (spectral solar irradiance for 10 ~ 100,000 nm), 这是由历史重建 (1850–2014 年) 和对未来最优的情景模拟 (2015–2299 年) 两个时间段组成。

由于现有的 Niño4 指数最早只能从 1950 年开始, 所以利用哈德莱中心的 SST 数据计算出 1870–2016 年 Niño4 区域 ($5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$, $160^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{W}$) 平均的 SST 指数序列。将 1950–2016 年的 Niño4 指数与美国国家气候预报中心 (the Climate Prediction Center, CPC) 提供的 Niño4 指数做相关,发现二者的相关系数高达 0.97 以上,因此在接下来的分析中使用由哈德莱中心 SST 数据计算的 Niño4 区域的 SST 平均作为 Niño4 指数,并用其来考察中太平洋海区 SST 的变率情况。

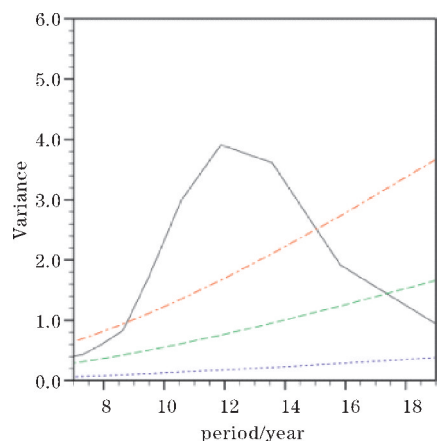
采用英国气象局哈德莱中心 (Met Office Hadley Center) 提供的逐月 SST 资料,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$; 以及逐月的 SLP 资料,水平分辨率为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 。还用到美国国家海洋大气局 (National Oceanic and Atmospheric Administrator, NOAA) 的 20 世纪月平均再分析资料 (twentieth century reanalysis v2c), 包括 u 和 v 风场 (sigma level 0.995), 垂直速度和垂直气温,水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, 垂直方向从 1000 ~ 100 hPa; 还用到了云和短波辐射通量,水平分辨率为 $2^{\circ} \times 1.75^{\circ}$ 。选取的时间段为 1910–2010 年。

所有数据均计算成年平均数据,由 Niño4 和 TSI 指数的谱分析可知, Niño4 和 TSI 均存在 9 ~ 12 年的主周期 (见图 1)。因此,为了去除年际信号 (主要是 El Nino-Southern Oscillation, ENSO), 所有数据都进行了 8 ~ 15 年的带通滤波处理。此外,为了去除全球变暖的影响,还通过线性最小二乘拟合去除了所有数据的线性趋势。采用了带通滤波、相关分析、功率谱分析和线性回归等统计诊断方法对 TSI 和热带中太平洋 SST 以及相关气候变量的关系进行研究讨论。所有的统计

分析均采用给定信度的 t 检验来考察显著性。



(a) TSI 的功率谱



(b) Niño4 的功率谱

图1 1910–2010 年 CMIP6 TSI 和 NCEP Niño4 指数的功率谱分析

2 结果

2.1 海温和海平面气压对太阳辐射的响应类型

为了解太阳辐射变化对热带中太平洋 SST 年代际变化的影响,对 TSI 指数和 SST 进行回归分析。从图 2 左列可以看出从热带太平洋东北部延伸至热带太平洋中东部的海区存在显著的 SST 正异常,这一正异常现象一直持续至滞后于 TSI 3 年 (图 2b ~ e)。其中在滞后于 TSI 1 ~ 2 年时,热带中东太平洋的 SST 正异常达到最强,且向东延伸至太平洋东边界 80°W , 向南延伸至 30°S (图 2c ~ d)。这与 Niño4 指数与 SST 回归的分布型相似 (图 2a)。从滞后于 TSI 3 年开始,热带中东太平洋的 SST 正异常减弱 (图 2e ~ f), 甚至在滞后于 TSI 5 年时,热带太平洋的 SST 正异常转变为负异常 (图 2g)。

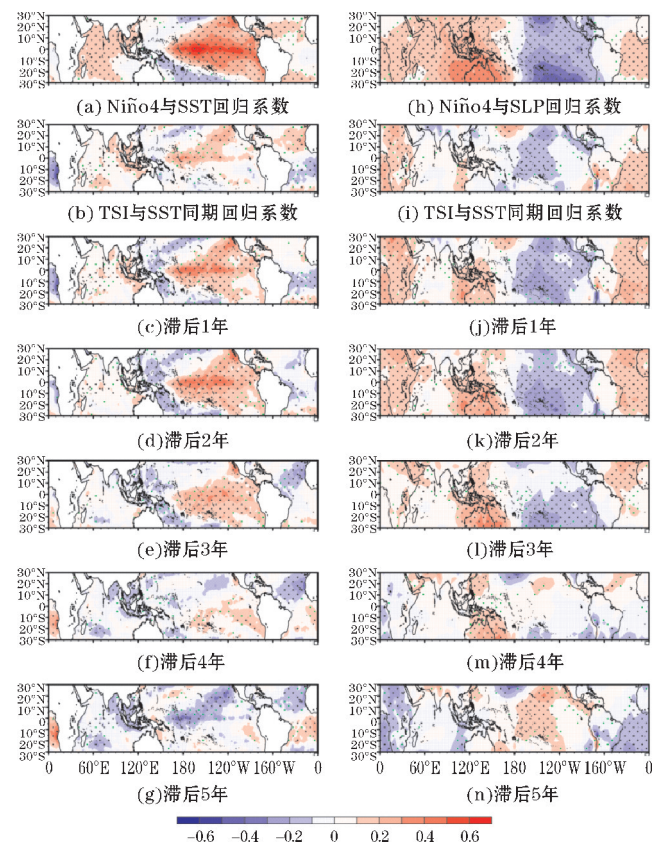


图2 Niño4指数与SST和SLP的回归系数图
(黑点、绿点分别表示通过99%、95%的显著性检验)

海气耦合是热带太平洋气候系统中最重要特征之一。图2右列给出的是TSI与SLP的回归系数图。SLP与Niño4指数回归的空间分布型表现为南方涛动型(图2h)。SST和SLP与TSI指数回归的结果呈现耦合关系,显著SLP低压异常在滞后1~2年时达到最大(图2j~k)。在滞后3年时逐渐变弱(图2l),在滞后5年(图2n)时与同期(图2i)时相反。

2.2 表面风场的响应类型

SST和SLP对TSI的响应特征与表面风场存在耦合,有利于维持热带太平洋SST年代际变化,可以在强太阳辐射年加强热带辐合带(ITCZ)和信风,随后在热带东太平洋地区形成暖区^[23]。把这个机制理解为Bjerknes反馈在年代际尺度上的一种表现形式,是ENSO增长的主导机制^[24]。图3给出的是TSI和表面风场的回归系数图。由图3所示,与SST回归的结果相对应,热带太平洋180°附近存在明显的西风异常,赤道东太平洋存在持续1年以上的东风异常(图3a~b)。在滞后于TSI 2~3年时,偏西风强度和范围不断增大,一直从西太平洋区域(10°N~10°S, 160°E~150°W)穿过赤道到达东南部(图3c~d)。在滞后4~5年时赤道西风异常减弱和消失,最后转变为东北风异常(图3f)。

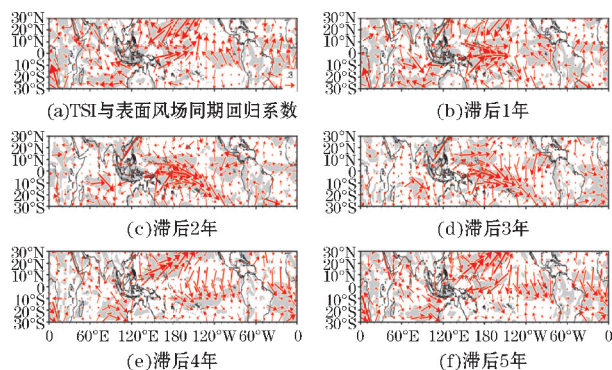


图3 TSI和表面风场同期以及滞后1~5年的回归系数图
(灰色阴影地区表示为通过95%的显著性检验)

在正常年份时,热带太平洋地区SST的分布主要表现为西暖东冷。在同期和滞后于TSI 1~3年时,持续增强的偏西风减弱了热带太平洋纬向温度梯度,有利于热带西太平洋暖海水向东扩展,使得更多的暖水在热带中东太平洋累积。热带太平洋SST异常和西风异常存在正反馈机制,从而放大了热带中东太平洋SST的增暖效应,产生热带中东太平洋型SST增暖。而在滞后4~5年时,随着热带西太平洋偏西风减弱,偏东风的增强,导致东太平洋的表层冷水向西传播,使中东太平洋的SST正异常向负异常转变。这种海气相互作用有利于热带太平洋SST对太阳辐射的滞后响应。

2.3 垂直速度和气温的响应类型

图4进一步给出了热带太平洋垂直速度对太阳辐射响应的空间分布型。通过计算5°S~5°N的经向平均垂直速度,在同期时,垂直速度的显著正异常出现在日界线附近,负异常出现在西太平洋、大西洋和印度洋附近(图4a)。在滞后1~2年时,显著正异常东移并逐渐增强,并且在滞后2年达到最大(图4b~c)。在滞后3~5年,显著正负异常减弱,并且在滞后5年转相(图4d~f)。值得注意的是,经向和纬向平均温度异常对TSI的响应一直从对流层到个海表面均存在(图5a~1)。

垂直运动变化与沃克环流对TSI的响应有关。在滞后1~2年时,垂直速度异常东移并显著加强,对应沃克环流有异常东移的趋势。Kodera^[25]研究表明,当沃克环流东移时,会出现厄尔尼诺型SST增暖。这可能在年代际尺度上也是适用的。从经向平均垂直速度图上也看出太阳辐射除了对太平洋区域具有显著影响外,对温带地区也有影响,是一种具有全球性特征的现象^[26]。

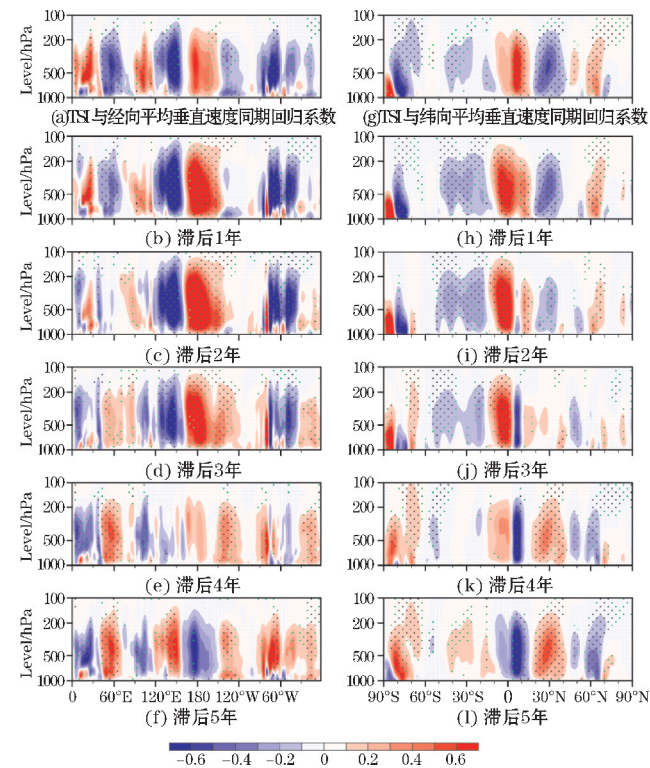


图 4 TSI 和垂直速度的同期和滞后 1~5 年的回归系数图((a)~(f) 经向平均(5°S~5°N)和(g)~(l) 纬向平均(160°E~150°W),图中黑点、绿点分别表示通过 99%、95% 的显著性检验)

以上结果表明热带太平洋 SST 与太阳辐射的关系变化可能是由于与沃克环流相关联的近地表西风东移所导致的。Kodera 等^[27]研究表明,大气对太阳辐射的吸收主要存在于地球表面和平流层,近地表面的高温是由于大气吸收了太阳的可见光能量,在平流层区域的增暖主要通过臭氧吸收太阳紫外部分的能量实现。前人研究表明通过平流层-对流层相互作用,太阳辐射先加热平流层底层的温度,最后通过哈德莱环流加热对流层热带太平洋区域的温度^[26-28]。从 TSI 和纬向平均垂直速度的回归系数图中可以看出,对应的上升运动在温暖的热带太平洋区域,下沉运动在赤道外 30°S 和 30°N。随着滞后时间的增加,TSI 和纬向平均垂直速度的关系发生了反转(图 4g~l)。从纬向平均气温图也可看出太阳辐射通过改变哈德莱环流可以改变热带太平洋地区对流层温度,并且延伸到海表面(图 5g~l 和图 2b~g)。

2.4 总云量和辐射通量的回归分析

为进一步研究太阳辐射引起的热带太平洋 SST 和大气环流异常变化过程,对总云量进行了诊断分析,发现在热带东北太平洋到中太平洋是显著正异常。正异常中心位于热带中太平洋和赤道北侧(图 6a)。到了滞后于 TSI 1~3 年时,热带太平洋的总云量显著增加,最强正异常中心位于热带中太平洋地区(图 6b~d),此

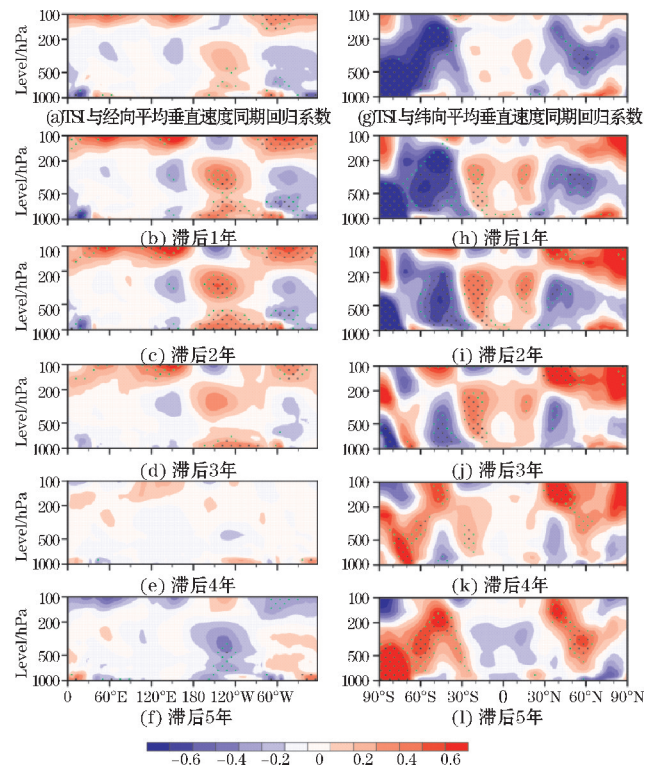


图 5 TSI 和垂直气温的同期和滞后 1~5 年回归系数图

时最强的 SST 正异常也位于热带中东太平洋(图 2c~e)。而滞后于 TSI 4~5 年时,总云量在中太平洋逐渐转为负异常(图 6e~f)。总云量无论是同期还是滞后于 TSI,都与 SST 的空间型分布较为相似(图 6a~f 和图 2b~g)。也就是说,热带太平洋中部的 SST 正异常和总云量相对应,反之亦然。

热带太平洋总云量对 TSI 响应的空间分布型主要受到 SST 对 TSI 响应的影响。SST 正异常有利于增加海水的蒸发和空气中水汽的增加,伴随着上升运动的冷却,从而增加了热带太平洋上空的云量。由于云的存在及其分布的不均匀性对地球表面产生不同的热力学效应,云会对太阳短波辐射起到吸收和阻挡作用,使得只有一小部分太阳短波辐射到达地面^[19]。因此进一步分析 TSI 和辐射通量之间的关系及其对热带太平洋 SST 年代际变化的可能影响。

为了解 TSI 与辐射通量的关系及其对热带太平洋 SST 的影响,将 TSI 与净辐射通量、净短波辐射通量和净长波辐射通量分别进行回归分析。这里规定短(长)波辐射向下(上)为正,向上(下)为负,则净短(长)波辐射为向下(上)短(长)波辐射与向上(下)短(长)波辐射的差值。由 TSI 与辐射通量的关系表明,中太平洋地区净辐射主要受净短波辐射的影响(图 6g~l),受净长波辐射的变化影响较小(图略)。发现热带中太平洋的净短波辐射通量的回归结果滞后于总云量的回归结果(图 6)。即 SST 正异常导致总云量的增加,因此净短波辐射通量减小。

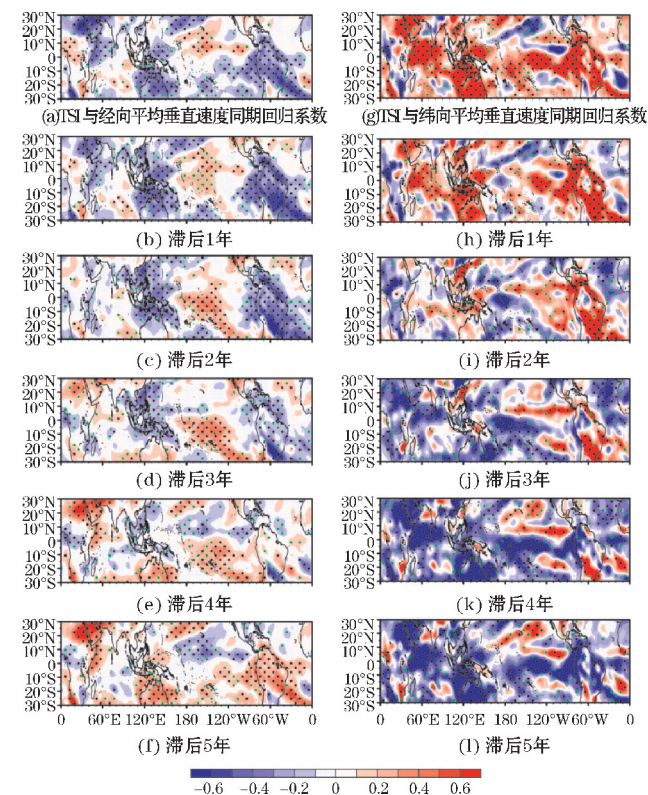


图 6 TSI 与总云量(a)~(f)同期和滞后 1~5 年的回归系数图以及 (g)~(l)净短波辐射通量同期和滞后 1~5 年的回归系数图(图中黑点、绿点分别表示通过 99%、95% 的显著性检验)

在同期时,净短波辐射随着 TSI 的增加有利于热带中太平洋 SST 的增暖。在滞后 1~2 年时,随着总云量的增加,导致热带中太平洋海表接收到的向下短波辐射减少(图 6b~c 和图 6h~i)。在滞后 3 年时,尽管总云量的增加将进一步降低进入到热带太平洋表面的太阳短波辐射,但由于海洋巨大的热容量能够贮存太阳辐射能量,同时 SST 升高所形成的云还具有保温作用^[29],因此此时的热带中东太平洋 SST 仍然以正异常为主(图 2e)。到了滞后 4~5 年时,净短波辐射通量在热带太平洋区域为负值,以向上的短波辐射为主(图 6j~l)。

图 7 进一步展示了热带太平洋与其他各气候变量,包括 SST、总云量、净短波辐射、纬向风、气温和垂直速度(1000~10 hPa)之间的关系。其中纬向风和垂直速度为区域(5°S~5°N, 150°W~130°W)的平均,其余的变量为区域(5°S~5°N, 160°W~140°W)的平均。可见,只有净太阳短波辐射与 TSI 在同期时相关达到最大,而海温、总云量和垂直气温的相关在滞后 2~3 年的相关最大。以上的结果支持了 TSI 对热带太平洋 SST 年代际变化的影响。即通过改变到达洋面的净太阳短波辐射和激发热带太平洋的海气相互作用,从而进一步增强热带太平洋 SST 年代际异常的信号。

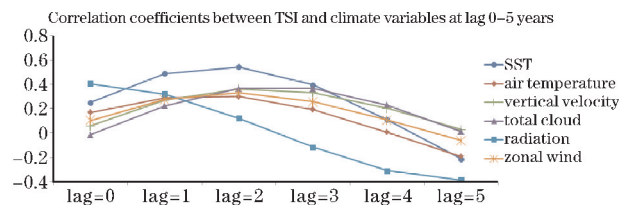


图 7 TSI 分别与区域平均的 SST、总云量、净短波辐射、纬向风、气温和垂直速度的相关系数图

综上,太阳总辐照度对热带中太平洋 SST 年代际变化影响如图 8 所示。

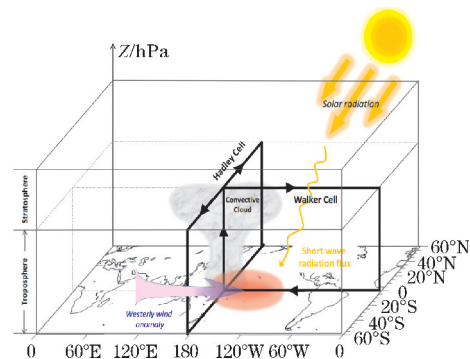


图 8 太阳辐射影响风场、环流、云和净短波辐射导致热带中太平洋暖 SST 异常示意图

3 结论和讨论

利用太阳总辐照度来表征太阳辐射的变化,诊断分析了其对热带中太平洋海表温度年代际变化的可能影响及机制,主要结论如下:

(1)功率谱分析结果表明,热带中太平洋 SST 和太阳辐射指数 TSI 存在类似的准 11 年周期。利用 TSI 对 SST 进行回归分析显示,SST 响应型表现为热带中东太平洋 SST 异常和 TSI 之间存在显著的滞后相关性,即在滞后 1~3 年热带中东太平洋 SST 为最显著正相关,证实了热带太平洋 SST 异常对太阳辐射的变化存在滞后响应。SLP 和 TSI 的回归系数分布图与 SST 呈反相关系。

(2)热带太平洋 SST 和纬向风异常在年代际尺度上存在明显的海气耦合关系,TSI 所引起的净短波辐射增加使得热带中太平洋 SST 异常增暖,进而伴随的异常纬向西风可能进一步促进热带中太平洋 SST 增暖的发展。大气环流对 SST 异常变化的响应主要表现为沃克环流东移和对流层温度升高。

(3)总云量的空间分布与 SST 的空间分布密切相关。随着 SST 的年代际增暖,加强了海水蒸发增多了空气中水汽含量,并伴随着上升运动的水汽凝结而形成云,因此增加了热带太平洋上空的总云量,但这种关系存在着一定的滞后性。虽然云-辐射反馈会减少到

达热带太平洋洋面的向下太阳短波辐射,但与 TSI 相关联的净短波辐射可能是热带太平洋 SST 增暖的直接原因。

根据以上的诊断分析结果,给出了太阳总辐照度对热带中太平洋 SST 年代际变化可能影响的示意图。在年代际尺度上,TSI 与净太阳短波辐射在同期达到最大,可以直接影响进入海洋的向下太阳短波辐射,有助于热带太平洋 SST 的增暖。在净太阳短波辐射的加热作用下,TSI 在热带中太平洋 SST 增暖中起到关键作用。通过热带太平洋的海气相互作用,由异常纬向西风引起的 SST 正异常对 TSI 的响应,在滞后 2 年达到最大。与此同时,SST 正异常还可以通过哈德莱环流使对流层温度升高;并增强海水的蒸发和空气中的水汽含量,通常伴随着沃克环流东移的上升支而形成云,这与垂直速度和纬向风变化一致,结果导致热带中太平洋总云量的增加。此外,由于云量的增加和云的存在,使得进入海洋的向下太阳短波辐射也会进一步减少。表面风和总云量对太阳辐射的响应都可以通过动力和热力过程反馈到 SST 本身。

主要利用线性统计方法对太阳辐射和热带太平洋 SST 年代际变化的关系进行研究分析,在一定程度上加深了对太阳辐射在年代际尺度上调节热带太平洋 SST 变化的认识。但是,热带气候系统的复杂性可能增加了深入理解太阳辐射对热带太平洋 SST 年代际变化影响机制的困难。例如,海气相互作用可能放大太阳辐射对海洋和大气的影 响,需要进一步加以研究。

参考文献:

- [1] Beer J, Blinov A, Bonani G, et al. Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity [J]. *Nature*, 1990, 347(6289): 164–166.
- [2] White W B, Lean J, Cayan D R, et al. Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1997, 102(C2): 3255–3266.
- [3] Rind D. The Sun's Role in Climate Variations [J]. *Science*, 2002, 296(5568): 673–677.
- [4] 李崇银, 翁衡毅, 高晓清, 等. 全球增暖的另一可能原因初探 [J]. *大气科学*, 2003, 27(5): 789–797.
- [5] Rind D, Lean J, Lerner J, et al. Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D24).
- [6] Zhao L, Wang J, Zhao H. Solar Cycle Signature in Decadal Variability of Monsoon Precipitation in China [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2012, 90(1): 1–9.
- [7] Pittock A B. A critical look at long-term Sun-weather relationships [J]. *Reviews of Geophysics*, 1978, 16(3): 400–420.
- [8] Kodera K. Solar influence on the Indian Ocean Monsoon through dynamical processes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(24): 1183–1186.
- [9] Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, et al. Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing [J]. *Science*, 2009, 325(5944): 1114–1118.
- [10] 肖子牛, 霍文娟. 太阳活动影响气候的放大过程之时空选择性 [J]. *气象科技进展*, 2016, 6(3): 141–147.
- [11] 胡敦欣. 海洋在中国气候变化中的作用 [C]. 中国地球物理学会年会, 2007.
- [12] Huo W J, Xiao Z N. Anomalous pattern of ocean heat content during different phases of the solar cycle in the tropical Pacific [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2017, 10(1): 9–16.
- [13] Loon H V, Meehl G A, Shea D J. Coupled air-sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D2).
- [14] Roy I, Haigh J D. Solar Cycle Signals in the Pacific and the Issue of Timings [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69(4): 1446–1451.
- [15] 王瑞丽, 肖子牛, 朱克云, 等. 太阳活动变化对东亚冬季气候的非对称影响及可能机制 [J]. *大气科学*, 2015, 39(4): 815–826.
- [16] 刘鹏, 江志红, 于华英, 等. 全球海表温度在不同时间尺度的主模态对比分析 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(7): 844–853.
- [17] Zhou J S, Tung K K. Solar cycles in 150 years of global sea surface temperature data [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(12): 3234–3248.
- [18] Wang G, Yan S, Qiao F. Decadal variability of upper ocean heat content in the Pacific: Responding to the 11-year solar cycle [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, 135: 101–106.
- [19] Meehl G A, Arblaster J M, Branstator G, et al. A Coupled Air Sea Response Mechanism to Solar Forcing in the Pacific Region [J]. *Journal of Cli-*

- mate,2008,21(12):2883–2897.
- [20] Roy I, Haigh J D. Solar cycle signals in sea level pressure and sea surface temperature[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*,2010,10(6):3147–3153.
- [21] Kodera K. Possible solar modulation of the ENSO cycle[J]. *Papers in Meteorology & Geophysics*,2005,55(1/2):21–32.
- [22] Misios S, Schmidt H. Mechanisms Involved in the Amplification of the 11-yr Solar Cycle Signal in the Tropical Pacific Ocean[J]. *Journal of Climate*,2012,25(14):5102–5118.
- [23] Roy I. The role of the Sun in atmosphere-ocean coupling[J]. *International Journal of Climatology*,2014,34(3):655–677.
- [24] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. *Monthly Weather Review*,1969,97(3):163–172.
- [25] Kodera K, Coughlin K, Arakawa O. Possible modulation of the connection between the Pacific and Indian Ocean variability by the solar cycle[J]. *Geophysical Research Letters*,2007,34(3):145–149.
- [26] Kodera K. Solar Influence on Troposphere Through the Polar and the Equatorial Stratosphere[C]. AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts,2004.
- [27] Kodera K, Kuroda Y. Dynamical response to the solar cycle[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*,2002,107(D24):ACL-1-ACL-5–12.
- [28] Matthes K, Kuroda Y, Kodera K, et al. Transfer of the solar signal from the stratosphere to the troposphere: Northern winter[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*,2006,111(D6).
- [29] 傅逸贤, 彭莹辉. 云量在“地-气”系统净辐射中的作用[J]. *气象科学*,1988(4):72–78.

Diagnosing Effect of Total Solar Irradiance on the Decadal Variability of SST over the Tropical Central Pacific

LIANG Jian¹, REN Hongli², CHEN Quanliang¹

(1. College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Laboratory for Climate Studies & CMA-NJU Joint Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The response of decadal sea surface temperature (SST) variations in the tropical Pacific to solar radiation is discussed. Possible effects of the total solar irradiance (TSI) on the decadal variation of SST in the tropical central Pacific are diagnosed using the linear regression based on HadI SST, 20th-Century reanalysis, and TSI datasets. The results show that the SST anomaly in the tropical central Pacific is clearly lagged behind the TSI with a period of quasi-11 year. By comparing the relationships between the TSI index and SST as well as other atmospheric variables, the SST anomaly pattern is featured by the most significantly positive correlation at lag 1–3 years, confirming the presence of the TSI signals in the decadal SST anomalies in the tropical central Pacific but with a lag response. The net shortwave radiation caused in phase by the TSI is clearly the direct contributor to the warming of the tropical Pacific SST on the decadal timescale even though it might be reduced by the cloud-radiation feedback after 2–3 lag years. The positive SST anomalies could induce changes in the surface zonal wind and might be in turn enhanced by the westerly wind anomalies through air-sea interaction over the tropical central Pacific. Also, these SST anomalies can warm tropospheric temperature and increase moisture into air, which favor formation of more cloud accompanied with the ascending motion. Both the responses of surface zonal wind and total cloud amount may provide a feedback onto SST itself in terms of dynamical and thermodynamical processes.

Keywords: meteorology; climate dynamics; solar radiation; decadal variability; tropical central Pacific; SST; TSI