

丁一汇, 2019. 太阳活动对地球气候和天气的影响[J]. 气象, 45(3): 297-304. Ding Y H, 2019. Effect of solar activity on earth's climate and weather[J]. Meteor Mon, 45(3): 297-304(in Chinese).

太阳活动对地球气候和天气的影响^{*}

丁一汇

国家气候中心, 北京 100081

提 要: 本文介绍近年来太阳活动对地球气候和天气影响方面的主要研究成果。包括四个关键的问题: (1) 太阳活动与地球系统的能量收支; (2) 太阳活动对地球气候的影响(包含气候变化、温室效应、火山); (3) 太阳活动对季风和天气的影响与(4) 太阳活动的变化会造成地球的长期寒冷气候吗? 通过对上述问题的阐述, 可以深入认识太阳活动对地球气候和天气影响的事实与机理, 以及对未来地球气候可能变化的前景, 从而为认识地球气候和天气变化的原因和驱动力提供更全面、更深刻的认识。

关键词: 太阳活动, 季风, 气候

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2019. 03. 001

Effect of Solar Activity on Earth's Climate and Weather

DING Yihui

National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: In this paper, the main research achievements about the influence of solar activity on the climate and weather of the earth are introduced. Four key issues are discussed, which are: (1) solar activity and the energy budget of the earth system; (2) impact of solar activity on the earth's climate, including climate change, greenhouse effect and volcanoes; (3) effect of solar activity on monsoon and weather; and (4) whether changes of solar activity will cause long-term cold climate of the earth. The elaboration to these issues is helpful for deeply understanding the fact and mechanism of the influence of solar activity on the climate and weather of the earth, and also the prospect of the possible changes of the earth's climate in the future. Thus, I hope this paper could present a more comprehensive and profound understanding of the causes and driving forces of climate and weather change on the earth.

Key words: solar activity, monsoon, climate

引 言

太阳是地球系统及其生命系统的原动力。地球系统作为一个巨大的热机, 太阳能为其提供取之不尽的热源, 驱动着地球系统特别是地球大气得以永不停息的运转, 不断地改变着大气赖以生存的天气与气候, 同时改变着地球的外部环境。2019 年世界气象日的主题是“太阳、地球和天气”。这一主题充分体现

了认识太阳活动对地球气候和天气影响的重要性。

1 太阳活动与地球系统的能量收支

太阳对地球的影响, 简称日地关系, 它是研究太阳核心通过复杂的物理过程引起的巨大核聚变反应, 放射的电磁波辐射在到达地球大气层时所产生的各种影响和现象, 例如地磁和电离层扰动, 宇宙射线变化, 天气和气候异常等(图1)。其中对地球天

^{*} 国家自然科学基金项目(41790471)资助

2019 年 2 月 25 日收稿; 2019 年 3 月 4 日收修定稿

作者: 丁一汇, 主要从事天气、气候和数值天气预报研究. Email: dingyh@cma. gov. cn

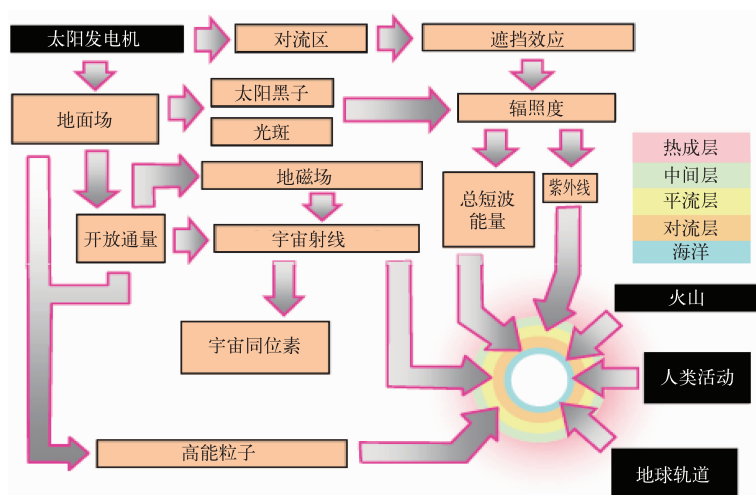


图 1 地球各种气候强迫的概略示意图

(图中给出影响太阳变率的强迫因子:辐照与粒子辐射;Gray et al,2010)

Fig. 1 Overview diagram of various climatic forcing on the earth
(including the forcing factors: irradiation and particle radiation,
affecting solar variability; Gray et al, 2010)

气与气候的影响是其中主要的一个方面。太阳内部这些复杂的物理过程,包括太阳黑子、光斑、日冕、日珥以及耀斑等现象,总称为太阳活动。为了定量测量大气层顶接收到的太阳总能量,目前最常用的一个指标是太阳总辐照度(total solar irradiance,

TSI)。在直接获得 TSI 之前,科学家不得不采用两种代用指标,一是太阳黑子数,它与 TSI 有直接的联系;另一是由大气层中形成的,存在于极地冰层和树木年轮中的放射性同位素。1978 年之后卫星仪器可直接测量 TSI(图 2),得到地球大气层顶部接

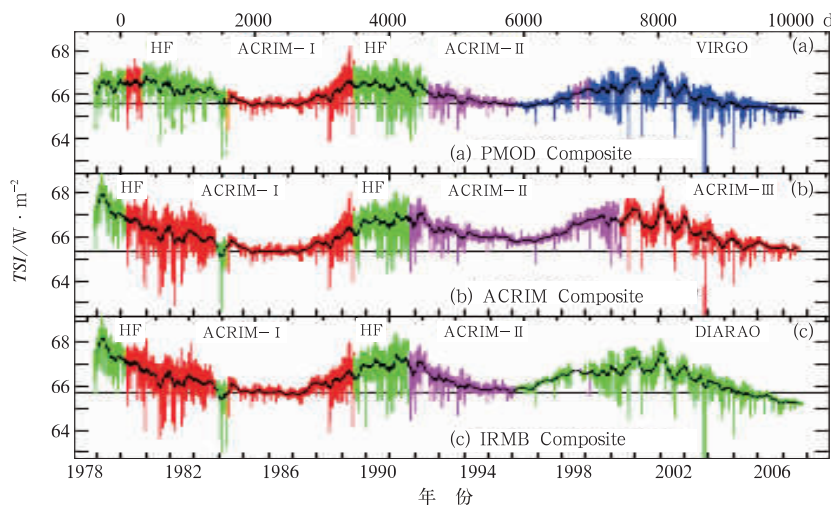


图 2 不同年代、不同卫星、不同星载仪器测量的太阳总辐照度曲线

(a) HF 和 PMOD, (b) HF 和 ACRIM, (c) HF 和 IRMB

(粗黑线为 81 d 平均;通过最小值画的水平黑线代表综合的最小值趋势;

图上方“0,2000,···,10000”代表从 1980 年 1 月起算起的天数;Gray et al,2010)

Fig. 2 Total solar irradiance measured by different periods, different satellites,
and different instruments on satellites

(a) HF and PMOD, (b) HF and ACRIM, (c) HF and IRMB

(Thick black line is the 81-day average; and the horizontal black line drawn by

the minimum value represents the comprehensive minimum trend; “0,2000,···,
10000” on the upper abscissa mean the days from January 1980; Gray et al,2010)

收到的太阳辐射平均值约为 $1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 这个值一般也被称为太阳常数。太阳常数其实并不真是一个常数, 它具有 5‰ 左右的变化。TSI 代表的到达大气顶的太阳辐射量, 并不能完全作用于大气层, 其中约有 30% 的能量会反射回太空中。依照黑子数得到的 TSI 日变化, 可追溯到 1610 年。太阳活动主要以约 11 a 为周期的太阳黑子周期变化。在最近的几个周期中, 第 22~24 周期, TSI 的平均波动值在 0.1% 左右, 在 1645—1715 年太阳活动非常弱的蒙德极小期, 通常被称作“太阳活动最低期”, 这时气候出现长期的严寒。从蒙德极小期至今, 有关太阳辐照度的变化, 与 11 a 的太阳黑子变化相似。太阳对地球表面温度变化的影响主要由 11 a 太阳周期控制。这可以解释全球温度波动值(图 3b)。在太阳活动最低期与最高期之间, 变化为 0.1°C 左右。在 20 世纪初, 太阳活动的增强(图 3b)、温室气体的增加(图 3e)、火山活动的减少(图 3c)与大气内部变率(图 3d)一起可以解释这一时期的增温和气候变暖(图 3a), 但并不能解释自 20 世纪 70 年代末观测

到的第二次快速增长, 因为从 1986—2008 年, TSI 是下降趋势, 这主要应归因于人类活动驱动的气候变暖作用。

这个结果表明, 相对于人为因素对气候变化的影响, 太阳在最高活动期与最低活动期变化范围内对全球气候的影响要小得多, 也就是说由人类对温室气体排放造成的温室效应, 起着主要作用(图 4)。图 4 说明了自然的温室效应(图 4a)与增强的温室效应(图 4c)。由于大气中水汽和温室气体的存在, 使地球的温度由 -19°C 上升 15°C 。如果由于人类的排放, 大气中 CO_2 浓度增加一倍(图 4b), 这时大气顶的辐射平衡将受到破坏, 由于增加的 CO_2 拦截了地球和大气放射的长波辐射, 使离开大气的长波辐射量只有 $236 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 因而气候系统内部将进行调整, 以恢复原有的平衡。根据斯蒂芬-玻耳兹曼公式, T_s 是地表平均温度, 地表必须升温 1.2°C 。温度升高之后, 根据克劳修斯-克拉珀龙方程, 大气中的水汽将增加, 这将使温室效应进一步加强。通过这种正反馈作用, 地表的增温将不是 1.2°C , 而是

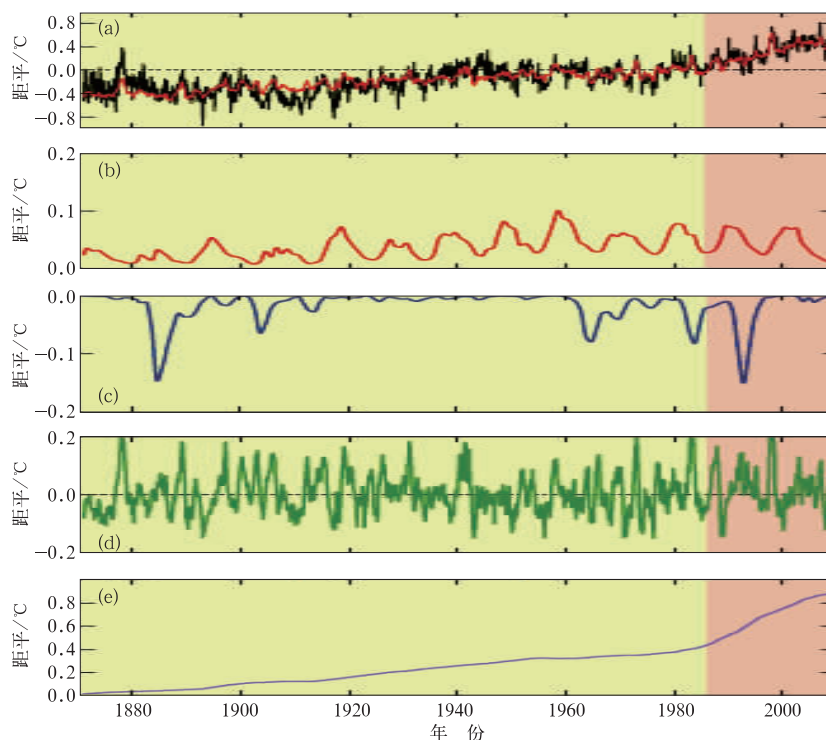


图3 1870—2010年全球地表温度距平(a),以及温度对太阳活动(b),火山活动(c),大气内部变率(d)和人类活动(包括温室气体增温与气溶胶降温)(e)的响应(IPCC, 2013)

Fig. 3 Global surface temperature anomaly (a), and the response of temperature to solar forcing (b), temperature response to volcanoes (c), internal variability (d) and anthropogenic component (including greenhouse gas warming and aerosol cooling) (e) in 1870—2010 (IPCC, 2013)

2.5℃(图 4d),所以反馈作用是非常明显的。

应该指出,当人为造成的温室效应由于温室气体减排而减弱,同时太阳的 TSI 下降出现最低期,地球的气候是否会变冷,甚至会进入寒冷期呢? 这个问题在近年引起一定的争论,在第 4 节将讨论这

个问题。

地球系统在大气顶,接受到的净太阳辐射(TSI 减去大气的云层和颗粒物反射掉的约 30%的 TSI 之后)是如何驱动大气运动的,这是认识太阳活动引起地球气候和天气的一个关键问题。由图 5 可以看

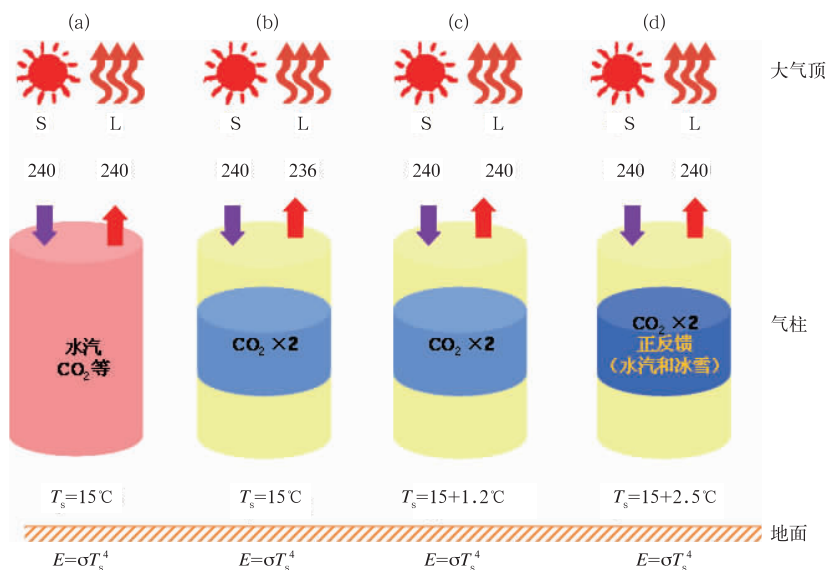


图 4 地球的自然温室效应和增强的温室效应示意图

(a) 自然的温室效应, (b) CO_2 浓度增加到原来的 2 倍,

(c) 增强的温室效应, (d) 反馈作用

(由 Houghton 的图改绘, 2009)

Fig. 4 Schematic diagram of the earth's natural greenhouse effect and enhanced greenhouse effect

(a) natural greenhouse effect, (b) doubled CO_2 concentration,

(c) enhanced greenhouse effect, (d) feedback effect

(modified from Houghton's diagram, 2009)

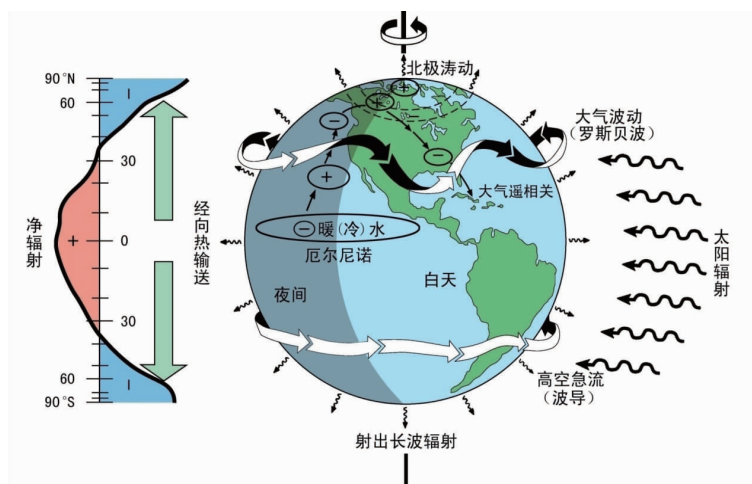


图 5 由于太阳辐射在经向分布的不均匀导致的全球大气环流的变化

(根据 IPCC 的图改绘)

Fig. 5 Changes in global atmospheric circulation caused by uneven distribution of solar radiation in meridional direction

(modified from IPCC)

到气候系统与地表的辐射平衡是气候形成的最基本的驱动力或气候形成的原动力。由于辐射在纬向和垂直方向上分布的不均匀或收支不平衡,必然会驱动大气和海洋产生运动,进行能量的转换(辐射能转化为热能,热能转化为动能,同时热能又转化为势能)和输送,而使地球系统建立新的平衡,实现不断变化的全球能量平衡。因而热量平衡是地球系统能量平衡要求的重要物理过程和机制。正是通过热量平衡导致了大气环流以及各种天气气候现象的发生。

由上可见,地球能量收支的不平衡导致了气候的变化,而地球能量收支的纬向分布不均匀导致了地球(包括海洋与大气)温度场和环流场的形成。大气辐射的长期脉动通过上两种机理可能影响了过去的气候,尤其是中世纪气候异常暖期(MCA)和寒冷的小冰期(LIA),以及20世纪初的增暖。

2 太阳活动对地球气候的影响

太阳活动对地球气候的影响一直是日地关系研究的中心问题之一(Kodera et al, 2016; Matthes et al, 2017)。过去大多采用统计方法或个例分析,因而研究结果不确定性大,结果之间一致性低。近代的研究不但增加了更多资料,在方法上更加定量化,机理上更为合理,尤其是采用气候模式的模拟,因为明显减少了结果的不确定性,特别是从21世纪初以来,对于太阳活动对地球气候的量化研究得到了新的结果。研究发现,虽然太阳变率的11 a周期对20世纪全球地表温度的变异有一些影响,但在1951—2010年,太阳的外强迫作用是小的,其增暖值加上火山的作用不到 0.1°C 。根据全球地表温度与太阳强迫估算的某些回归研究,太阳最大与最低活动期间的全球地表温度变化估算为 0.1°C 量级。气候模式的结果一般则不到上述变化值的一半。由11 a太阳循环变率也产生了可测量的短期区域和季节气候异常,尤其在印度太平洋、亚洲北部和北大西洋地区,但很难判别这个地区太阳活动强迫在ENSO事件中的信号。对北大西洋NAO(北大西洋涛动),太阳活动最小期NAO负位相更为盛行。这与冬季欧洲增加的高压阻塞事件频率偏高的观测有一定相近。

虽然大量研究结果并不完全一致,但总体上肯定太阳活动或太阳的辐射变化确实能够影响地球的气候。人们会问太阳的变化非常小,但为什么或通

过什么机制和过程,太阳能是地球气候异常与气候变化的一种重要驱动力?根据观测和气候模式模拟的研究,目前提出了两种机制解释上述太阳对气候的低振幅区域或全球的响应。这两种机制是可叠加且相互增强的,以使对太阳辐射初始微小变化的响应在区域上得以增幅。第一种机制被称为上到下机制,即在峰值太阳年有更强的太阳紫外辐射(UV),直接通过增加辐射与间接通过 O_3 造成平流层增暖。以后,这能造成影响热带深对流的一系列过程链。此外,在太阳处于最小条件下,热带平流层上部的加热比平均值小,这减弱了赤道-极地温度梯度。这种信号可向下传播,减弱对流层中纬西风带,有利于北极涛动(AO)或NAO变为负位相。这种响应在一些模式中被模拟出来,但平均来说在CMIP5模式中AO或NAO对太阳辐射变化并无显著性。第二种机理被称为下向上机制,它涉及到热带和副热带太平洋的耦合海气辐射过程。同样也影响热带内部地区的对流,这种机制也被认为是在更长时间尺度上(年代到百年尺度)影响区域温度,有助于解释古气候资料中见到的区域温度变化。但这种机制对全球或半球平均温度,无论在短期或长期时间尺度上几乎都没有太大影响(王绍武等, 2012)。

为使太阳变率与地球气候系统相关联的信号增加,还需要增幅机制。研究表明与太阳磁场活动变化有关的宇宙射线通量变化是一种增幅机制。通过这种机制可影响对流层中电离引起的气溶胶核化产生云凝结核(CCN)。强太阳磁场能使宇宙射线偏转,导致更少的CCN和更少的云量,以此允许更多的太阳辐射能进入气候系统,但对上述增幅机制的重要性近年来也提出了相反意见,指出宇宙射线通量与观测的气溶胶或云属性之间的相关较低,至多是局地性的,并不能证明其与全球或区域尺度的相关是可靠的。此外,有些研究提出至少两种增幅机制,去解释观测到的小区域季节气候异常与11 a太阳循环间的联系,这主要发生在印度太平洋地区与北半球中高纬地区。

最后值得指出,火山喷发通过产生大量的火山灰或颗粒物以及二氧化硫(SO_2)气体经与水反应可形成硫酸液滴组成的云。这种硫酸云可以将太阳光反射回太空,阻挡其到达地面,从而使地表降温,同时也使低层大气降温。这些高层大气(可以达到平流层)的硫酸云也从太阳、地球和低层大气吸收能量,从而使高层大气升温。例如1991年菲律宾的皮

纳图博火山喷发,向平流层射入约 2000 万 t 的 SO_2 ,将地球降温约 0.5°C 长达一年左右。在全球范围内火山喷发,也减少了降雨量,因为地表入射的短波辐射减少,也使地表蒸发减少。热带与副热带火山的喷发会产生更明显的全球地表或对流层降温,这是因为火山形成的硫酸云,在高层大气可持续 1~2 a,并且能够覆盖地球大部分地区。由于热带火山喷发产生的高层大气硫酸云能从地球吸收更多的阳光和热量,在热带比高纬的大气产生更多的升温,因此气候的反应更加明显且复杂。但近年来观测与研究表明,中高纬的火山或中小型火山的喷发对地球气候的影响也不容忽视。

3 太阳活动对季风和天气的影响

中国位于东亚季风区,天气气候深受冬、夏季风活动的影响。太阳活动对季风的影响,长期以来受到天文、地质和气象工作者的关注,对其做了大量研究,得到了许多重要的成果(Mohtadi et al, 2016; 丁一汇等, 2018; 丁一汇, 2017)。中国科学家根据丰富的记录研究了太阳活动与东亚和印度夏季风的关系,对古季风变率获得了时空分辨率更高的结果。由于地轴的倾斜与进动,调制着太阳到达地球的日射时空分布,尤其是地轴的进动或岁差以 1.9 万 a 和 2.3 万 a 周期影响着入射太阳辐射的季节分布及其半球分布,因而对季风强度的变化具有重要的控制作用。一个突出的例子是在全新世早期和中期的大暖期,北半球具有比今天更高的夏季日射,这时北非夏季风十分强盛,从而在景观上把撒哈拉沙漠转变为草原或热带大草原。一般而言,季风降水和季

节变化(即年循环振幅)在进动最小值时(称为近日点,此时为北半球夏至,在地球绕日轨道上,地球最接近太阳),在北半球增强、南半球减小,反之亦然。对大量古气候代用资料(如稳定高分辨率的氧同位素与绝对定年的石笋)也证实了这种由进动造成的 1.9 万 a 或 2.3 万 a 周期引起的季风变化的半球间反向关系。这个结果和相关的数值模拟都支持绕日地球轨道的进动,对所有季风区的降水具有强的作用,即进动达最小值时,北半球夏季日射强,海陆温差大,这使大气温度(季风降水的热力分量)和季风环流强度增加,而南半球夏季具有相反变化的状况。

另外绕日地球轨道的倾角(即 obliquity)的变化也以 4 万 a 的周期、同样的程度影响两半球的入射太阳辐射,其中在高纬更强。古气候研究表明,虽然入射太阳辐射在热带变化小,但对季风系统的强度有重要影响,当倾角达最大时,夏季风降水增加。但应该指出地球轨道参数对季风影响的研究并不一致。这取决于所研究的不同季风期对轨道强迫的响应不同,也受到研究季风区不同的内部反馈的影响。但轨道尺度对所有季风区强迫通过改变日射的经向梯度或加热场,确实能影响季风系统的变化,这为气候变化背景下认识未来季风环流和降水的变化十分有益。

对现代季风,太阳活动也表现了对季风的影响。在太阳活动高值年,在大部分亚洲夏季风区、北美夏季风区(1978—2010 年时期)、南大西洋区(包括亚非夏季风区),都表现出近地面南风一致的增加。但太阳指数和射出长波辐射(OLR)间的相关系数并未在季风区显示对流活动有均匀的增加。在北半球近赤道地区,如印度洋、南美和非洲对流活动减少,而在亚洲,北半球赤道到 $15^\circ\sim 20^\circ\text{N}$ 地区对流增加(图 6)。

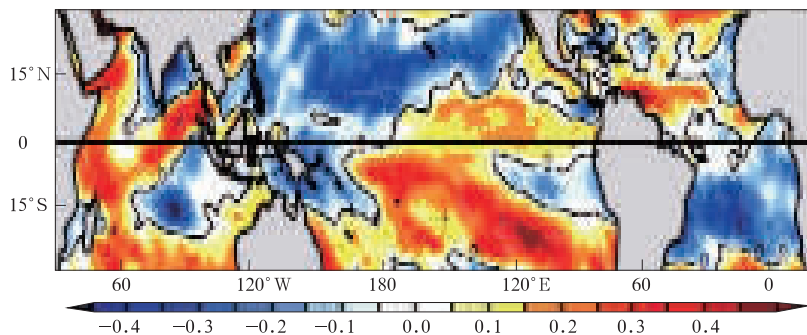


图 6 北半球夏季(JJA)射出长波辐射(OLR)与太阳总辐度(TSI)的相关分布
(Kodera et al, 2016)

Fig. 6 Correlation distribution of OLR (emitted long-wave radiation) and TSI in summer (JJA) over the Northern Hemisphere (Kodera et al, 2016)

因而热带地区的太阳信号表明,太阳活动并未导致全球季风环流的增强,但哈得来环流上升支或辐合区向北移动。这种向北移动也引起 SST 场向南北结构的变化,这可能是由于大陆的不对称分布所致。

最近 Zhao and Wang(2014)和 Zhao et al(2017)研究了太阳 11 a 循环对中国夏季风雨带,特别是与梅雨带的关系,得到了更为量化的相关关系(图 7),

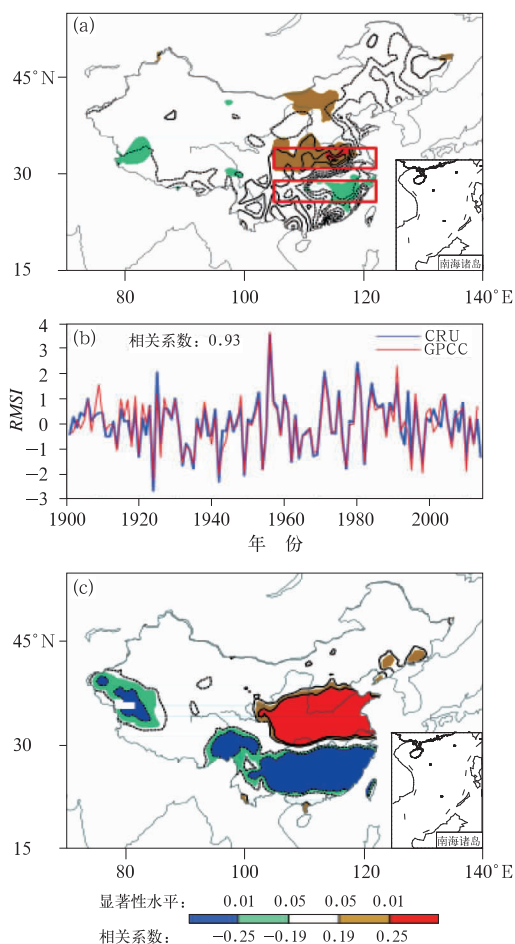


图 7 1901—2014 年太阳活动最大和最小值期(相对黑子数)6 月降水综合差值分布(a)(矩形代表长江中下游地区与淮河流域);(b)6 月中国季风雨带经向移动指数(RMSI);(c)6 月 RMSI 与中国降水的显著性相关系数(Zhao et al, 2017)

Fig. 7 Comprehensive difference distribution of precipitation in June between the maximum and minimum values in solar activity periods (relative sunspot number) during 1901—2014

(a) the rectangle represents the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and Huaihe River Basin; (b) the June monsoon rain meridional movement index (RMSI) of China; (c) significant correlation coefficient between RMSI and the June precipitation in China (Zhao et al, 2017)

揭示出在过去 5 个太阳循环中梅雨带与太阳变率有确定的关系。在高太阳黑子数(SSN)年梅雨带的平均位置偏北 1.2 个纬度(图 7),与低太阳黑子年相比,其年际变率振幅增加,这种比较确定的季风雨带与太阳强迫的关系,与上下呈跷跷板关系的异常大气环流型有关,也与东亚南北跷跷板关系有关。Zhao et al(2017)后来进一步研究太阳信号对中国夏季风雨带的增幅作用,指出在太阳黑子数最大年的初夏,季风雨带比太阳最小年更为向北移。同时在 20 世纪大部分时间中,太阳黑子数的明显年代尺度振荡与雨带经向位移指数(RMSI),从 20 世纪 60 年以来是锁相的,且太阳黑子数超前于雨带纬向位移指数约 1.4 a。风和 E-P 通量分析表明,6 月雨带的年代尺度振荡可能产自一种更强或更早的对流层季风爆发,于 5 月和 6 月高太阳活动月,副热带西风急流的向北移动,低层热带季风与上层西风急流对 11 a 太阳活动循环的动力响应,分别传输从下到上和从上到下的太阳信号,季风和急流之间的协同作用可能放大了季风北缘的太阳信号(图 8)。

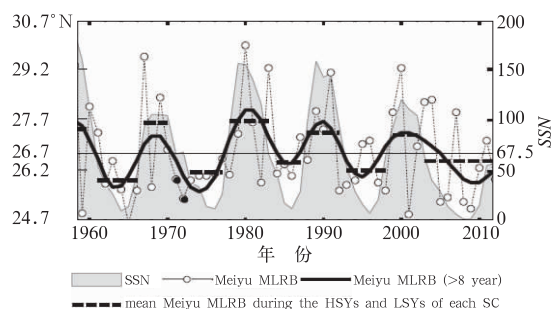


图 8 1958—2012 年 SSN(阴影),未过滤的东亚梅雨季雨带平均位置(MLRB)(带圆点的曲线),8 年低通滤波的东亚梅雨季(MLRB)(粗实线),[太阳黑子数,SSN;水平虚线为每个太阳周期的 MLRB 平均值,细实水平线代表平均 SSN(67.5)与平均 MLRB(26.7°N);东亚梅雨季长度为 5 月 22 日至 7 月 13 日(Zhao and Wang, 2014)]

Fig. 8 Annual SSN (shadows), averaged position of unfiltered rain band in Meiyu season in East Asia (MLRB) (dotted curve), MLRB by low-pass filtering in 8 years (thick solid line) with horizontal dashed lines being the average values of solar cycles [The thin solid horizontal line represents the average SSN (67.5) and the average Meiyu MLRB (26.7°N) in 1958—2012; The Meiyu season in East Asia is from 22 May to 13 July. Zhao and Wang, 2014]

4 太阳活动的变化会造成地球的长期寒冷气候吗?

根据长期的太阳黑子数资料(可追溯到 1610 年)与其他代用资料,可发现存在着一些长达 50~100 a 的明显极低太阳活动期,其中最著名的之一为发生在 1645—1715 年的蒙德极小值期。大部分对蒙德极小值与今天 TSI 变化的估值在 0.1%量级,类似于 11 a 变率的振幅。根据近千年太阳黑子与地面温度关系的分析,4 个太阳活动极小期,对应于重建的温度表现为极小值与温度谷值或冷期相对应,即太阳活动极小值期的温度距平在 -0.5°C ~ -0.4°C ,这个结论最近得到了模拟研究的证明。因而太阳活动极小期确实是引起地球气候冷期的一个主要自然原因,但将来何时会出现一个极低太阳活动期,并且在气候继续变暖的情况下,是否会引起一次新的寒冷气候,具有很大的不确定性。长期的太阳黑子资料,分析表明,从 1920 年开始,太阳活动进入了现代极大期,至今已经历了 8 个太阳活动强的 11 a 周期。目前的太阳活动确实已经出现了明显减弱的趋势,尤其从太阳黑子第 23 周之后,不但明显减少且周期也长,周期长反映了太阳活动减弱,但太阳总辐射量 TSI 并没有明显变化。现在的关键问题是从 1920 年之后延续的太阳活动极大期是否会在未来 50 年内结束,如果结束,极低太阳活动期是否会持续发展,至少目前大多数的研究表明(王绍武,2011),目前出现的只是异常减弱迹象,还不是历史记录上导致大冷期的 11 a 周期变化类型。即便真正出现前兆,究竟何时会发生一个大的太阳活动极小期,其导致的降温量值有多大?在全球气候变暖继续的条件下是否能逆转变暖趋势,都存在着一些问题和不确定性。这是未来气候变化值得关注和研究的重大科学问题,以目前的科学水平尚不能真正给予确定的回答。

致谢:赵亮、许小峰、张锦和宋亚芳对本文提供的很多帮助。

参考文献

- 丁一汇,2017. 气候学原理第四讲[Z]. 北京:中国气象局培训中心.
Ding Y H, 2017. The Fourth Lecture Principle of Climatology [Z]. Beijing: China Meteorological Administration Training Centre(in Chinese).
- 丁一汇,司东,柳艳菊,等,2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J]. 大气科学,42(3):533-558. Ding Y H, Si D, Liu Y J, et al, 2018. On the characteristics, driving forces and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon[J]. Chin J Atmos Sci, 42(3):533-558(in Chinese).
- 王绍武,2011. 全新世气候变化[M]. 北京:气象出版社:212. Wang S W, 2011. Holocene Climate Change[M]. Beijing: China Meteorological Press:212(in Chinese).
- 王绍武,黄建斌,闻新宇,2012. 古气候的启示[J]. 气象,38(3):257-265. Wang S W, Huang J B, Wen X Y, 2012. Implications of paleoclimate[J]. Meteor Mon, 38(3):257-265(in Chinese).
- Gray L J, Beer J, Geller M, et al, 2010. Solar influences on climate [J]. Rev Geophys, 48(4):RG4001.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press:1535.
- Kodera K, Thiéblemont R, Yukimoto S, et al, 2016. How can we understand the global distribution of the solar cycle signal on the earth's surface? [J]. Atmos Chem Phys, 16(20):12926-12944.
- Matthes K, Funke B, Andersson M E, et al, 2017. Solar forcing for CMIP6 (v3. 2)[J]. Geosci Model Dev, 10(6):2247-2302.
- Mohtadi M, Prange M, Steinke S, 2016. Palaeoclimatic insights into forcing and response of monsoon rainfall [J]. Nature, 533(7602):191-199.
- Zhao L, Wang J S, 2014. Robust response of the East Asian monsoon rainband to solar variability[J]. J Climate, 27(8):3043-3051.
- Zhao L, Wang J S, Liu H W, et al, 2017. Amplification of the solar signal in the summer monsoon rainband in China by synergistic actions of different dynamical responses[J]. J Meteor Res, 31(1):61-72.