

太阳活动与地球表面温度变化的周期性和相关性

赵新华*, 冯学尚*

中国科学院空间科学与应用研究中心, 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

* 联系人, E-mail: xhzhao@spaceweather.ac.cn; fengx@spaceweather.ac.cn

2013-09-27 收稿, 2013-11-29 接受, 2014-03-31 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2012CB825601)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZZD-EW-01-4)、国家自然科学基金(41031066, 41231068, 41274179, 41174150)、国家空间科学中心“五个重点培育方向”课题和海洋公益性行业科研专项资助

摘要 基于太阳黑子历史数据、太阳总辐照(TSI)重构数据和实测地球表面平均温度数据(全球、陆地、海洋), 利用小波分析和交叉相关分析等方法, 考察了太阳活动和地表温度变化在数百年时间尺度上的周期性及相关性。主要结果有: (1) 在所考察的时间范围内, 太阳活动(包括黑子和太阳总辐照)存在 4 个置信度高于 95%(白噪声)的主周期变化, 分别为 11 a 周期、50 a 周期、世纪周期和双世纪周期, 全球温度存在 64.3 a 的主周期变化, 接近太阳活动的 50 a 周期; (2) 太阳活动与全球温度变化具有 22, 50 a 的显著共振周期; (3) 太阳活动与地表温度长期变化的相关性高于其短期变化的相关性, 以黑子为例, 它与地表温度年均值的相关系数为 0.31~0.35, 11 a 滑动平均值相关系数为 0.58~0.70, 22 a 滑动平均值相关系数为 0.64~0.78, 太阳总辐照与地表温度的相关性高于黑子与地表温度的相关性; (4) 太阳活动在近 100 年里有明显增强, 它与全球温度(包括陆地、海洋)近 100 年的升温是一致的, 太阳活动与海洋温度的相关性略高于太阳活动与陆地温度的相关性。这些结果表明, 太阳活动在百年时间尺度上对于地表温度的变化具有不可忽略的影响。

关键词

太阳活动
全球变化
小波分析
周期性
相关性

全球气候变暖是当前国内外研究的热点问题, 也是最有争议的问题。除大气环流和地表状况以外, 太阳活动、人类活动及火山活动也是影响气候变化的重要因素。太阳是地球气候系统的能量来源, 发生在太阳对流层和太阳大气层中的各种复杂物理过程通称为太阳活动。人们很早就发现太阳活动是 10 年到百年时间尺度上地球气候变化的主要自然驱动力。譬如, Herschel^[1]早在 1801 年就推测太阳变化会引起地球气候的改变, 并得到黑子少时降雨量少的结论。随后的很多工作找到了太阳活动与某些气候参数之间具有良好相关性的支持证据^[2~6]。其中, Eddy^[2]发现太阳黑子异常减少的蒙德极小期(Maunder Minimum, 1645~1715 年)在时间上正好对应于西欧“小冰期”的低谷期; Currie^[4]发现气候的诸多要素(如气温、降雨量、海平面等)都存在着类似太阳活动的

周期性变化; Lean 等人^[5]发现 1610~1800 年太阳辐射变化与北半球地面气温之间相关系数高达 0.86; Friis-Christensen 等人^[6]也发现北半球陆地表面温度与太阳活动周期长度之间也具有很强的相关关系。我国学者研究了我国气候的长期变化规律^[7]及其与太阳活动之间的关系^[8~13], 发现太阳活动对我国气候变化具有影响, 并且这种影响具有区域性差异^[14]。另一方面, 自工业革命以来人类活动导致大气中温室气体浓度的急剧增加, 越来越多的研究认为这是引起 20 世纪全球气候变暖的最主要原因之一。以联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)为代表的国际主流观点认为过去 50 年里地球平均温度的显著增高 90%以上是由人类活动排放的温室气体造成的, 相比之下自然变化对气候的影响可以忽略不计^[15~17]。然而, 由于气候系统的高度复杂性和人们认识水平

引用格式: 赵新华, 冯学尚. 太阳活动与地球表面温度变化的周期性和相关性. 科学通报, 2014, 59: 1284–1292

Zhao X H, Feng X S. Periodicities of solar activity and the surface temperature variation of the Earth and their correlations (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 1284–1292, doi: 10.1360/972013-1089

的局限性,有关全球变暖成因的争议一直都未停止.冰芯数据及其他历史资料显示全球温度具有明显的波动特征,当下的全球变暖属于气候波动的正常范畴^[7,18],历史上既有与 20 世纪温度相当的暖期,也有比 20 世纪温度低的冷期,这表明没有近代人类活动的影响也会产生类似的变暖,并且 19 世纪末处于自然变化的冷期,由此开始计算 20 世纪的全球变暖会带来一定的偏差^[19];事实上自然界才是大气中温室气体的主要来源(<http://www.nbcnews.com/id/28074879/>),IPCC 的气候模型低估了自然因素对气候变化的影响却夸大了人类活动的贡献^[20].导致全球气候变化的因素有很多,许多学者指出太阳活动是驱动地球气候变化的重要因素^[21~23].因此,从较长时间尺度上考察太阳活动对地球气候的影响仍具有十分重要的价值.温度是最基本的气象要素之一,也是观测资料积累较长、能反映气候变化的一个重要参数,因此本文将在百年至数百年时间尺度上探讨太阳活动与地球表面温度长期变化的周期性及其之间相关关系.

1 数据与分析方法

黑子数(sunspot number)是描述太阳活动最常用的参数,也是观测资料积累时间最长的太阳活动参数.现代黑子的测量始于望远镜的发现(约 1610 年),但校正过的系统黑子数观测比之又晚了大约 1 个世纪,即从 18 世纪开始^[24].本文所用的黑子数据下载自太阳影响数据分析中心网站(Solar Influences Data Analysis Center: <http://sidc.oma.be>),数据包含了 1700~2012 年共 313 a 的年均值黑子数.另一种常用的太阳活动参数是大气顶上的太阳总辐照(Total Solar Irradiance, TSI),它一度被认为是直接作用于地球气候的太阳活动参数.然而太阳总辐照的空间观测开始于 20 世纪 80 年代,至今也只有约 30 年的数据积累,这对研究气候变化的长期效应来说显然是不够的.鉴于此,本文拟使用 LASP/LISIRD 网站提供的历史重构太阳总辐照数据(http://lasp.colorado.edu/lisird/tsi/historical_tsi.html).该太阳总辐照数据是基于 Wang 等人^[24]的磁通量传输模型重构得到的,涵盖了 1610~2012 年共 403 a 的年均太阳总辐照流量数据.全球平均温度是反映全球气候变化最常用的参数之一,它的连续测量开始于 1880 年;本文拟采用的全球平均温度数据下载自美国 NOAA 国家气候数据中心(National Climate Data Center, [\[ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php\]\(http://ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php\)\),包括年均全球温度异常、年均陆地温度异常和年均海洋温度异常 3 种数据,时间跨度为 1880~2012 年,共 133 a.这里的温度异常是指温度与参考值之差,参考值取为 20 世纪\(1901~2000 年\)的温度平均值.在分析方法方面,小波分析是一种较新的现代分析方法,常用于分析时序信号的功率谱局部变化;与传统傅立叶分析和谱分析方法相比,小波分析能兼顾时域和频域的局域化特性,给出数据序列更丰富的信息,并考虑有限数据的边缘效应对其周期的影响^{\[25,26\]}.本文将采用文献\[26\]所提供的 Morlet 小波程序来考察太阳活动及全球温度变化的周期性,并研究它们之间的小波相关性\(wavelet coherency\);此外,本文还将用到线性相关分析和交叉相关分析\(cross correlation\),这些由 IDL 语言的 CORRELATE 和 C_CORRELATE 函数来实现.](http://www.</p>
</div>
<div data-bbox=)

2 数据分析

2.1 周期性分析

图 1(a)给出了 1700~2012 年太阳黑子数年均值变化的原始信号,图 1(b)是经过 Morlet 小波变换之后它的方差归一化全局功率谱随周期的变化,背景功率谱采用白噪声检验,虚线表示 95%置信水平线.由图可知,太阳黑子数的变化存在 4 个置信水平高于 95%的周期,分别为 10.7, 52.7, 100.9 和 173.4 a(图中箭头所示);其中 10.7 a 即为众所周知的太阳黑子 11 a 周期(Schwabe 周期),也是最为显著的黑子周期,52.7 和 100.9 a 分别为黑子的 50 a 周期和世纪周期(Gleissberg 周期),它们在一些文献中也有报道^[27,28],173.4 a 的周期接近黑子的双世纪周期(Suess 周期),如 Ogurtsov 等人^[29]分析 ^{14}C 记录数据显示太阳活动双世纪周期的周期长度在 170~260 a 之间,由于这里所用太阳黑子数据的时间跨度只有 312 a,因而无法反映更长时间的黑子周期性.这些结果也显示了我们所使用资料及分析方法的可靠性.

类似地,图 2(a)给出了 1610~2012 年太阳总辐照年均值变化的原始信号,图 2(b)是经过 Morlet 小波变换之后其方差归一化全局功率谱随周期的变化,虚线表示 95%置信水平线(白噪声背景功率谱).对比图 1(b)与图 2(b)可知,太阳总辐照功率谱分布与黑子功率谱既有相似地方也有显著区别,太阳总辐照最显

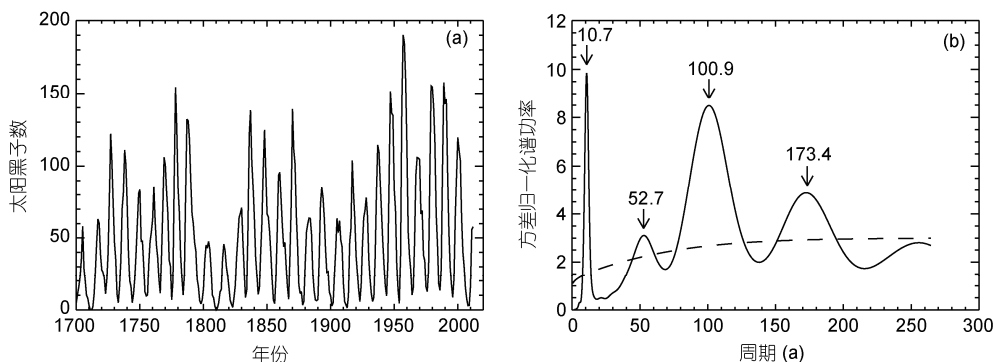


图 1 1700~2012 年太阳黑子数年均值变化(a)及其方差归一化全局小波功率谱(b)
(b)中虚线表示 95%置信水平谱(白噪声)

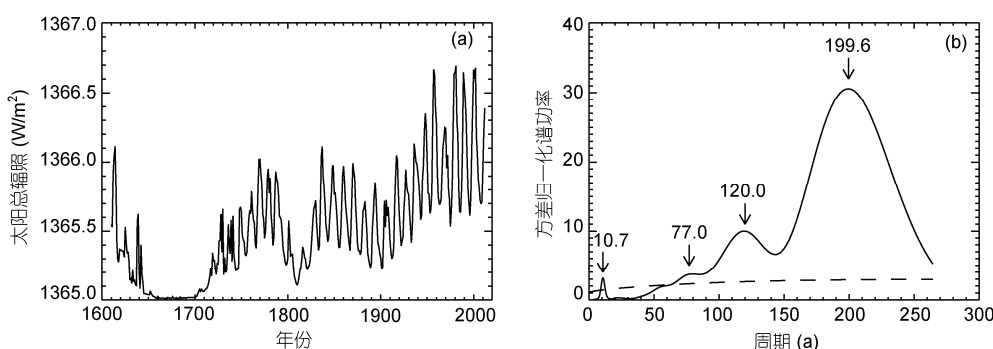


图 2 1610~2012 年太阳总辐照年均值变化(a)及其方差归一化全局小波功率谱(b)
(b)中虚线表示 95%置信水平谱(白噪声)

著的周期不再是 11 a 周期,而是世纪周期(120 a)和双世纪周期(199.6 a), 11 a 周期(10.7 a)为 4 个置信水平高于 95%的周期中最弱的,太阳总辐照的 50 a 周期(77 a)、世纪周期和双世纪周期的周期长度都略高于太阳黑子相应的周期.可见,太阳总辐照更多表现出来的是低频(即长周期)变化.

图 3(a)给出了 1880~2012 年地球年平均温度异常的变化.由图可知,在过去 100 年里,地球的平均温度经历了一个明显的上升,上升的幅度超过 0.5°C ,并且陆地平均温度的上升略高于海洋平均温度的上升,全球平均温度的上升介于二者之间.图 3(b)是经过 Morlet 小波变换之后全球平均温度全局功率谱(方差归一化)随周期的变化.由图可知,在所考察的这一时期里,全球平均温度的变化只有一个显著的 64.3 a 的周期性,它在周期长度上介于黑子的 50 a 周期(52.7 a)和太阳总辐照的 50 a 周期(77 a)之间,周期的一致性说明全球温度的变化是与太阳活动相关的;全球温度还有 21.8 和 34.3 a 两个周期,但它们均低于

95%置信水平线;太阳活动 11 a 周期的高频变化部分在全球温度中没有响应.可见全球平均温度仅在低频部分(50 a 周期)响应太阳活动的变化,相比之下,全球温度功率谱分布更接近太阳总辐照功率谱的分布.由于陆地平均温度功率谱、海洋平均温度功率谱与全球平均温度的功率谱相似,此处不再详细给出.

2.2 相干性分析

小波分析不仅能考察时序信号的周期性,还能给出 2 个时序信号之间的小波相干性(wavelet coherence),该相干性定义为 2 个时序信号交叉谱的平方除以每个信号的功率谱,它的值在 0 和 1 之间,能揭示 2 个时序信号局部的交叉相关性随频率(即周期)的分布^[26].图 4(a)给出了黑子数与全球平均温度的整体相干性随周期的分布,曲线的变化有 4 个显著的波峰,对应的周期分别为 21.3, 32.5, 52.3 和 81.6 a,相应的相关系数分别为 0.73, 0.82, 0.60 和 0.65.这表

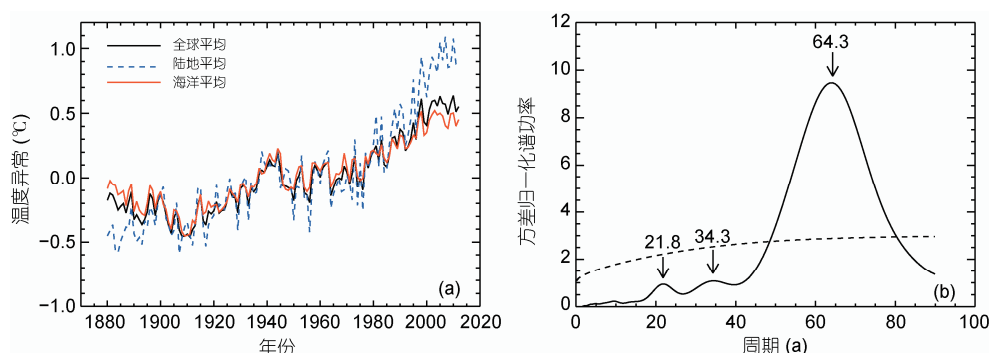


图3 1880~2012年地表年均温度异常(a)及全球温度的方差归一化全局小波功率谱(b)

(a)中黑色实线代表全球平均,蓝色虚线代表陆地平均,红色实线代表海洋平均.温度异常是指温度与20世纪平均温度之差;
(b)中虚线表示95%置信水平谱(白噪声)

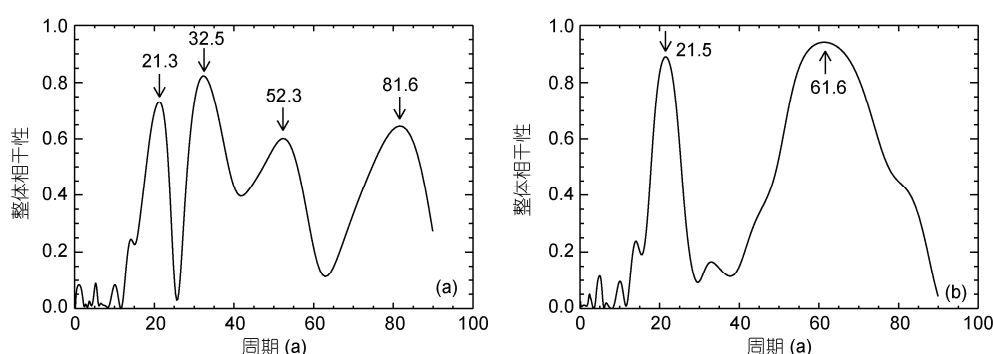


图4 太阳黑子数(a)和太阳总辐照(b)与全球平均温度的整体相干性随周期分布

明,黑子与全球温度变化在这些周期分量上具有较高的相关性,相关系数为0.6~0.8,也即太阳黑子与全球温度具有21.3,32.5,52.3和81.6 a的显著共振周期.同理,图4(b)给出太阳总辐照与全球平均温度的整体相干性随周期的分布,曲线的变化有2个显著的波峰,对应的周期分别为21.5和61.6 a,相应的相关系数分别为0.89和0.94.可见,太阳总辐照与全球温度变化有21.5和61.6 a两个显著共振周期.综合图4(a)和(b)可知,无论黑子数还是太阳总辐照,它们都与全球温度具有22 a的显著共振周期,这个22 a周期正是太阳的磁活动周;与黑子数相比,太阳总辐照与全球温度共振的周期变少,但相干性变强,其中的62 a(61.6 a)周期是全球温度变化唯一存在的主周期分量(图3(b)中的64.3 a周期).因此,太阳总辐照较太阳黑子与全球温度具有更高的相干性,且主要集中在温度的主震荡周期附近.

除小波分析外,线性相关分析和交叉相关分析也是分析数据相关性最常用的方法.使用IDL语言中的CORRELATE和C_CORRELATE函数对太阳

黑子数、太阳总辐照与全球温度进行线性相关分析和交叉相关分析.这里,CORRELATE函数计算2组数据之间的线性皮尔逊相关系数,不考虑数据点之间的错开(提前或延后),即计算同期相关系数,而C_CORRELATE函数则计算2组数据之间的交叉相关系数随数据点提前或延后的分布.首先计算黑子数与温度年均值之间的相关性,计算结果表明:太阳黑子数与全球温度年均值(A_{glob})的同期线性相关系数为0.16,置信度为90%,当全球温度延后黑子21 a时相关系数最大,达到0.35,置信度大于99.9%;黑子数与陆地温度年均值(A_{land})的同期线性相关系数为0.11,置信度为80%,当陆地温度延后黑子21 a时相关系数最大,达到0.31,置信度大于99.9%;黑子数与海洋温度年均值(A_{ocean})的同期线性相关系数为0.19,置信度为95%,当海洋温度延后黑子21 a时相关系数最大,达到0.35,置信度大于99.9%.同样地,计算了太阳总辐照与温度年均值之间的相关性,详细结果见表1.作为一个例子,图5(a)给出了太阳黑子数与全球温度年均值相关系数随温度延后时间的

分布,当全球温度延后黑子 21 a 时相关系数达到最大值 0.35;图 5(b)给出太阳总辐照与全球温度年均值相关系数随温度延后时间的分布,当全球温度延后太阳总辐照 9 a 时相关系数达最大值 0.57. 由表 1 可知,一方面太阳总辐照与温度之间的相关性高于黑子与温度之间的相关性,如太阳总辐照与年均全球温度的相关系数为 0.54(同期)和 0.57(延后 9 a),相应置信度都大于 99.9%,而黑子与年均全球温度的相关系数则为 0.16(同期)和 0.35(延后 21 a),相应置信度分别为 90%和大于 99.9%;另一方面,太阳活动(包括黑子和太阳总辐照)与海洋温度的相关性略高于太阳活动与陆地温度的相关性,太阳活动与全球温度的相关性则位于二者之间(以与太阳总辐照的相关性为例,相关系数 $0.58>0.57>0.51$).

同理,表 2 和 3 分别给出了太阳活动(黑子数和太阳总辐照)与地表温度(全球、陆地、海洋)11 和 22 a

滑动平均值之间的相关系数. 选择 11 和 22 a 作为取平均值的区间是因为它们是典型的太阳活动周期,也是太阳活动与地球表面温度之间具有较高相关性的周期分量(见 2.1 节和本节前面所述). 表 1 中所反映出来的规律在表 2 和 3 中依然存在,即:太阳总辐照与温度的相关性高于黑子与温度的相关性、太阳活动与海洋温度的相关性略高于太阳活动与陆地温度的相关性. 另外,对比表 1, 2, 3 可发现,随着取平均的时间宽度增大,太阳活动与地表温度之间的相关性也逐步增强,从年平均、11 a 滑动平均到 22 a 滑动平均,黑子数与全球温度的相关系数依次为 0.35, 0.67 和 0.73, 太阳总辐照与全球温度的相关系数依次为 0.57, 0.85 和 0.89, 相关系数单调上升,而在 22 a 滑动平均尺度上太阳总辐照与海洋温度之间的相关系数更是达到了 0.9, 对于样本数目为 133 个的大样本数据来说,如此高的相关系数显示了数据之间确实存

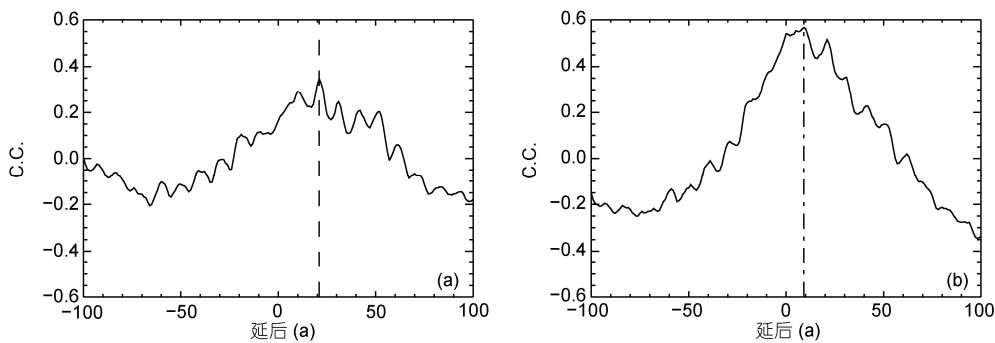


图 5 太阳黑子数(a)和太阳总辐照(b)与全球温度年均值相关系数随温度延后时间的分布

“延后”>0 表示全球温度延后黑子或者太阳总辐照,“延后”<0 表示黑子或者太阳总辐照延后全球温度,C.C.为相关系数

表 1 太阳活动与地表温度年均值相关系数^{a)}

年均值相关性(1880~2012 年)		A_{glob}	A_{land}	A_{ocean}
太阳黑子数	延后(a)	0	0	0
	相关系数	0.16	0.11	0.19
	置信度	90%	80%	95%
	延后(a)	21	21	21
	相关系数	0.35	0.31	0.35
	置信度	>99.9%	>99.9%	>99.9%
太阳总辐照	延后(a)	0	0	0
	相关系数	0.54	0.49	0.56
	置信度	>99.9%	>99.9%	>99.9%
	延后(a)	9	9	9
	相关系数	0.57	0.51	0.58
	置信度	>99.9%	>99.9%	>99.9%

a) A_{glob} , A_{land} , A_{ocean} 分别表示全球、陆地和海洋温度年均值,延后(a)表示温度延后太阳黑子或太阳总辐照的时间

表 2 太阳活动与地表温度 11 a 滑动平均值相关系数^{a)}

11 a 滑动平均值相关性(1880~2012 年)		A'_{glob}	A'_{land}	A'_{ocean}
太阳黑子数	延后(a)	0	0	0
	相关系数	0.41	0.33	0.47
	置信度	90%	85%	95%
	延后(a)	16	18	16
	相关系数	0.67	0.58	0.70
	置信度	99.9%	99%	>99.9%
太阳总辐照	延后(a)	0	0	0
	相关系数	0.84	0.80	0.85
	置信度	>99.9%	>99.9%	>99.9%
	延后(a)	6	0 ^{b)}	6
	相关系数	0.85	0.80	0.88
	置信度	>99.9%	>99.9%	>99.9%

a) A'_{glob} , A'_{land} 和 A'_{ocean} 分别表示全球、陆地和海洋温度 11 a 滑动平均值, 延后(a)表示温度延后黑子或太阳总辐照的时间; b) 表示同期相关系数最大

表 3 太阳活动与地表温度 22 a 滑动平均值相关系数^{a)}

22 a 滑动平均值相关性(1880~2012 年)		A''_{glob}	A''_{land}	A''_{ocean}
太阳黑子数	延后(a)	0	0	0
	相关系数	0.53	0.45	0.58
	置信度	85%	80%	90%
	延后(a)	17	19	15
	相关系数	0.73	0.64	0.78
	置信度	95%	95%	99%
太阳总辐照	延后(a)	0	0	0
	相关系数	0.89	0.86	0.90
	置信度	>99.9%	>99.9%	>99.9%
	延后(a)	0 ^{b)}	0 ^{b)}	0 ^{b)}
	相关系数	0.89	0.86	0.90
	置信度	>99.9%	>99.9%	>99.9%

a) A''_{glob} , A''_{land} , A''_{ocean} 分别表示全球、陆地和海洋温度 22 a 滑动平均值, 延后(a)表示温度延后黑子或太阳总辐照的时间; b) 表示同期相关系数最大

在着一定的物理联系.

图 6(a)给出 11 a 滑动平均太阳黑子数随时间的变化及其与全球、陆地、海洋平均温度滑动平均值变化的比较(考虑时间延后), 延后时间的选取使得相关系数达到最大, 即全球温度延后黑子 16 a, 陆地温度延后黑子 18 a, 海洋温度延后黑子 16 a. 由图可知, 黑子数作为表征太阳活动强弱的最主要参数, 它在近 100 年里有明显增强, 它与全球温度(包括陆地、海洋)在近百年的升温趋势是一致的, 二者之间的线性相关系数在 0.6~0.7 之间. 同理, 图 6(b)给出 11 a 滑动平均太阳总辐照随时间变化及其与全球、陆地、海洋温度滑动平均值变化的比较(考虑时间延后), 延

后时间对应于相关系数最大, 即全球温度滞后太阳总辐照 6 a, 陆地温度滞后太阳总辐照 0 a, 海洋温度滞后太阳总辐照 6 a. 与黑子数相比, 太阳总辐照长期变化的趋势更为光滑, 其表现出来的近百年来的上升趋势更为平稳, 与全球温度(包括陆地、海洋)变化之间的相关性也更强, 相关系数在 0.8~0.9 之间. 因此, 太阳活动对于近百年全球温度的上升具有不可忽略的影响.

3 讨论与结论

太阳活动是影响地球气候变化众多自然因素中较受广泛关注的一个^[30~35]. 本文选取表征太阳活动

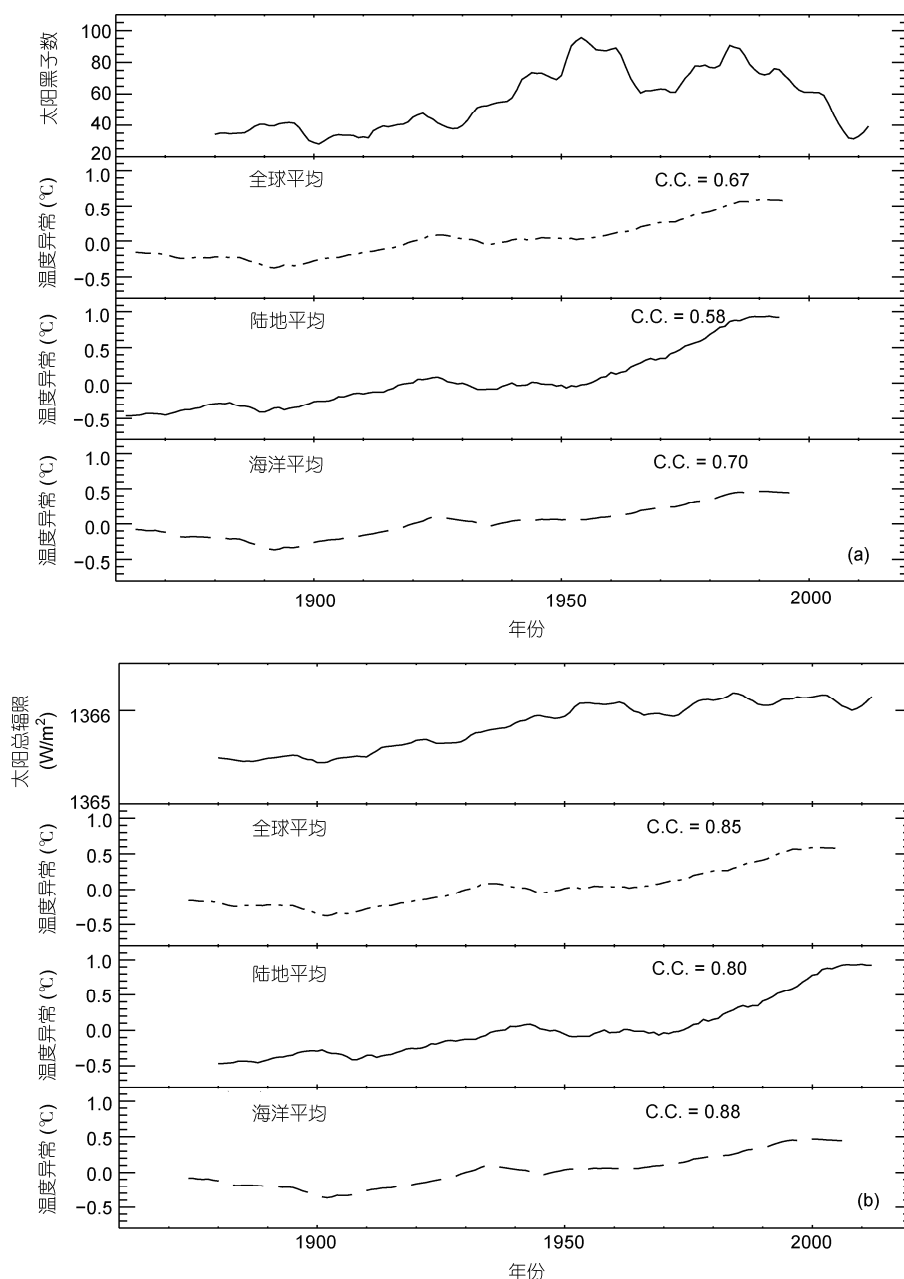


图 6 11 a 滑动平均太阳黑子数(a)和太阳总辐照(b)与地表温度变化比较

(a) 全球、陆地和海洋温度相对黑子数分别向左平移 16, 18 和 16 a; (b) 全球、陆地和海洋温度相对太阳总辐照分别向左平移 6, 0 和 6 a; C.C.表示黑子数或太阳总辐照与温度之间的线性相关系数

的 2 个重要参数: 黑子数和太阳总辐照指数. 分别使用长期历史观测资料和重构资料, 考察它们长期变化的周期性及其与地表温度变化之间的相关性. 小波分析结果表明, 太阳活动存在 11 a 周期、50 a 周期、世纪周期和双世纪周期, 但黑子与太阳总辐照的功率谱分布还是存在一定的差异, 11 a 周期是黑子数最为显著的周期性变化, 相比之下, 太阳总辐照更多表

现出来的是长周期变化, 它的 50 a 周期、世纪周期和双世纪周期的周期长度都略高于黑子相应周期, 因此太阳的光辐射变化在大趋势上是随太阳磁活动变化的, 但比太阳磁活动变化来得平缓. 受资料时间跨度的限制, 这里不能给出太阳活动更长时间尺度的周期性变化, 而且双世纪周期本身也已经受到数据边缘效应的影响, 不过它可以被之前的一些类似研

究结果证明确实存在. 全球温度的变化在所考察的时间段里只有一个显著的 64.3 a 的周期性, 它的周期长度介于黑子 50 a 周期(52.7 a)和太阳总辐照 50 a 周期(77 a)之间, 相比之下, 全球温度功率谱分布更接近太阳总辐照的功率谱; 这表明, 地球温度变化更多体现出来的是缓慢的长周期变化, 它对太阳光辐射的响应较为显著; 小波相干性分析也显示太阳总辐照较太阳黑子与地表温度具有更高的相干性, 且主要集中在温度的主震荡周期附近. 交叉相关分析表明, 当年均全球温度延后黑子 21 a 时二者之间的相关系数达到最大值 0.35, 相应的置信度大于 99.9%, 当年均全球温度延后太阳总辐照 9 a 时二者相关系数达最大值 0.57, 置信度大于 99.9%; 而且, 随着取平均的时间范围加大, 太阳活动与地表温度的相关性逐步增强, 从年平均、11 a 滑动平均到 22 a 滑动平均, 黑子数与全球温度的相关系数依次从 0.35 增加到 0.67 和 0.73, 太阳总辐照与全球温度的相关系数从 0.57 增加到 0.85 和 0.89. 可见, 太阳活动对地球气候的影响具有“延迟”和“积累”的双重效应: 一方面太阳

活动的变化只有过了若干年之后才能在地球气候中表现出来; 另一方面, 这种变化也只有持续了一定的时间才能“积累”出相应的效果, 高频率的太阳活动成分, 如 11 a 周期性变化, 并不会在地球气候中出现对应的响应. 近百年来太阳活动增强的所谓“现代极大期”在时间上正好对应着全球升温, 二者之间的相关性也十分高. 另外, 本文研究还发现太阳活动(包括黑子和太阳总辐照)与海洋温度的相关性略高于太阳活动与陆地温度的相关性, 造成这一结果的原因可能是由于陆地上的人类活动(如温室气体的排放)较多, 因而人类活动的影响在陆地气候变化中所占的比重会增加, 从而在一定程度上“削弱”了太阳活动对陆地气候的影响, 因此这一结果反过来会间接支持太阳活动影响地球气候变化的结论. 不过, 本文所用的资料也只有几百年的时间跨度, 这对研究气候的长期变化来说仍然是不够的, 如何在更长时间尺度上利用较为可靠的重构资料来研究太阳活动变化及其与地球气候变化之间的关系, 将是我们下一步的努力目标.

致谢 本文研究所用的太阳黑子数据、太阳总辐照数据和全球温度数据分别来自 SIDC 网站、LASP/LISIRD 网站和 NOAA/NCDC 网站, 所用小波分析程序是在 Torrence 和 Compo 提供程序的基础上修改的, 在此一并致谢.

参考文献

- 1 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 Lond*, 1801, 91: 265–318
- 2 Eddy J A. The Maunder Minimum. *Science*, 1976, 192: 1189–1202
- 3 Herman J R, Goldberg R A. Sun, Weather and Climate. Washington D C: NASA Spec Publ, 1978. 426
- 4 Currie R G. Distribution of solar cycle signal in surface air temperature over North America. *J Geophys Res*, 1979, 84: 753–762
- 5 Lean J, Beer F, Bradley R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 3195–3198
- 6 Friis-Christensen E, Lassen K. Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, 1991, 254: 698–700
- 7 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *中国科学*, 1973, 16: 168–189
- 8 赵娟, 李志安, 韩廷本. 太阳活动、El Niño 对北京地区降雨的影响及预测. *地球物理学进展*, 1999, 14: 123–126
- 9 汤懋苍, 柳艳香, 郭维栋. 天时、气候与中国历史(I): 太阳黑子周长与中国气候. *高原气象*, 2001, 20: 368–373
- 10 杨保, 施雅风, 周清波. 近 300a 来古里雅与长江下游温度变化所受太阳活动、火山活动的影响分析. *冰川冻土*, 2002, 24: 40–45
- 11 陈星, 刘健, 王苏民. 东亚地区小冰期气候的模拟. *气象科学*, 2005, 25: 1–7
- 12 徐群. 全球气候趋势和近期中国气候灾害的成因分析和展望. *气象科学*, 2010, 30: 582–590
- 13 张亮, 王赤, 傅绥燕. 太阳活动与全球气候变化. *空间科学学报*, 2011, 31: 549–566
- 14 顾震年. 太阳活动对地表气候和地球自转的影响. *天文学进展*, 1991, 9: 51–59
- 15 Levitus S, Antonov J I, Wang J, et al. Anthropogenic warming of Earth's climate system. *Science*, 2001, 292: 267–270
- 16 Solomon S. Climate Change 2007: The Physical Science Basis—Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 663–745

- 17 Stone D A, Allen M R, Stott P A. A multimodel update on the detection and attribution of global surface warming. *J Clim*, 2007, 20: 517–530
- 18 Dansgaard W, Johnsen S J, Moiler J, et al. One thousand centuries of climatic record from camp century on the Greenland ice sheet. *Science*, 1969, 116: 377–380
- 19 王绍武. 全球气候变暖的检测及成因分析. *应用气象学报*, 1993, 4: 226–236
- 20 Singer S F. *Nature, not Human Activity, Rules the Climate*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008. 10–18
- 21 Haigh J D. The impact of solar variability on climate. *Science*, 1996, 272: 981–985
- 22 Svensmark H. Cosmoclimatology: A new theory emerges. *Astron Geophys*, 2007, 48: 118–124
- 23 蒋样明, 彭光雄, 邵小东. 自然驱动是全球气候变化的重要因素. *气象与环境科学*, 2011, 34: 7–13
- 24 Wang Y M, Lean J L, Sheeley N R. Modeling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713. *Astrophys J*, 2005, 625: 522–538
- 25 Meyer Y. *Wavelets and Operators*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992
- 26 Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1998, 79: 61–78
- 27 韩延本, 韩永刚. 太阳黑子相对数变化的小波分析. *科学通报*, 2001, 46: 2031–2035
- 28 李可军, 苏同卫, 梁红飞. 现代黑子观测的太阳黑子活动的周期性. *科学通报*, 2004, 49: 2511–2516
- 29 Ogurtsov M G, Nagovitsyn Y A, Kocharov G E, et al. Long-period cycles of the sun's activity recorded in direct solar data and proxies. *Sol Phys*, 2002, 211: 371–394
- 30 戴开美, 钱幼能. 树木年轮 ^{14}C 含量与短周期太阳活动关系的研究. *科学通报*, 1987, 6: 441–443
- 31 段克勤, 王宁练, 李月芳, 等. 青藏高原达索普冰芯中积累量与太阳活动. *科学通报*, 2000, 45: 75–78
- 32 廖德春, 廖新浩. 太阳活动影响地球自转长周期变化的新证据. *科学通报*, 2001, 46: 13–16
- 33 钟巍, 王立国, 塔西甫拉提·特依甫, 等. 太阳活动对塔里木盆地南缘近 4 ka 以来气候波动的可能影响. *科学通报*, 2004, 49: 1079–1083
- 34 Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. *Rev Geophys*, 2010, 48: RG4001, doi: 10.1029/2009RG000282
- 35 刘立波, 万卫星, 陈一定, 等. 电离层与太阳活动性关系. *科学通报*, 2011, 56: 477–487

Periodicities of solar activity and the surface temperature variation of the Earth and their correlations

ZHAO XinHua & FENG XueShang

State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Based on the well-calibrated systematic measurements of sunspot numbers, the reconstructed data of the total solar irradiance (TSI), and the observed anomalies of the Earth's averaged surface temperature (global, ocean, land), this paper investigates the periodicities of both solar activity and the Earth's temperature variation as well as their correlations on the time scale of centuries using the wavelet and cross correlation analysis techniques. The main results are as follows. (1) Solar activities (including sunspot number and TSI) have four major periodic components higher than the 95% significance level of white noise during the period of interest, i.e. 11-year period, 50-year period, 100-year period, and 200-year period. The global temperature anomalies of the Earth have only one major periodic component of 64.3-year period, which is close to the 50-year cycle of solar activity. (2) Significant resonant periodicities between solar activity and the Earth's temperature are focused on the 22- and 50-year period. (3) Correlations between solar activity and the surface temperature of the Earth on the long time scales are higher than those on the short time scales. As far as the sunspot number is concerned, its correlation coefficients to the Earth temperature are 0.31–0.35 on the yearly scale, 0.58–0.70 on the 11-year running mean scale, and 0.64–0.78 on the 22-year running mean scale. TSI has stronger correlations to the Earth temperature than sunspot number. (4) During the past 100 years, solar activities display a clear increasing tendency that corresponds to the global warming of the Earth (including land and ocean) very well. Particularly, the ocean temperature has a slightly higher correlation to solar activity than the land temperature. All these demonstrate that solar activity has a non-negligible forcing on the temperature change of the Earth on the time scale of centuries.

solar activity, global change, wavelet analysis, periodicity, correlation

doi: 10.1360/972013-1089