

全新世气候对千年尺度太阳活动的可能响应

尹志强 韩延本 王博

(中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要: 利用熟知的山洞石笋资料及重建的太阳黑子数获取的时间序列, 讨论了长时间尺度上气候对太阳活动变化的可能响应。小波分析显示气候变化与太阳活动变化在约1000及约2000年周期上具有一致性, 这可能反映了全新世时期太阳活动的调制作用。另外, 小波功率谱显示在公元前2000年附近缺失千年周期, 这种突变及气候条件的长期变化可能给许多地区带来社会性影响。

关键词: 古气候, 太阳黑子数, 全新世

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.04.002

Possible Response of Climate to Solar Activity on Millennial Scale during the Holocene

Yin Zhiqiang, Han Yanben, Wang bo

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract: Based on well-known series from land-based caves and reconstructed sunspot numbers, the nature of climatic response to solar variability is discussed over a long-time scale. Wavelet analysis reveals coherence between the climatic and solar oscillations with periods of ~1000- and ~2000-yr that may reflect a modulation of solar activity during the Holocene. Moreover, the wavelet power spectra present that ~1000-yr cycle of these series is absent around ~2000 BC and this abrupt change and prolonged changes in climatic conditions might have brought about major societal challenges to many regions.

Keywords: paleoclimate, Sun sunspots, Holocene

1 引言

众所周知, 气候系统受许多因素的影响, 例如地球轨道变化、太阳活动变化、大型热带火山喷发、地面覆盖差异及温室气体等。其中, 太阳活动的变化是关键因素之一。目前有许多有关太阳活动变化与各种气候记录相关性的研究成果, 但涉及千年时间尺度的太阳活动驱动气候变化的机制与该驱动下气候系统响应之间关系的研究相对较少^[1-4]。

由于缺少更长时间的直接观测或仪器记录数据, 我们只能依靠代用指标来研究全新世时期的古气候。例如, 树木年轮、珊瑚、钟乳石及冰芯等代用指标通常能很好地反映太阳活动、气温、湿度及季风强度等^[5-7]。也有许多学者曾尝试从陆地及海洋代用指标中获取十年至百万年时间尺度的气候变化, 研究太阳活动对气候变化的驱动^[3, 7]。

对于千年周期尺度的气候变化, 格陵兰冰芯及北

大西洋的岩芯很好地记录了全新世期间气候变化^[8-9]。许多学者也在古气候资料, 例如在Big Lake沉积物记录^[10]、加拿大^[11]、北美花粉记录^[12]中找到了这些变化周期。Clemens等^[13]认为千年尺度的气候变化是由太阳活动世纪周期外差得来的。Bütikofer等^[14]研究表明, 全新世气候记录的典型特征是宽波段的准周期变化, 而不具有某一显著的谱峰。

本文对收集到的一些数据做了小波分析, 以进一步研究全新世千年尺度的气候变化, 并讨论存在的周期振荡及气候对太阳活动可能响应的时变特征。

2 数据及分析方法

2.1 重建的太阳黑子数

我们可以使用宇宙成因核素(如¹⁴C, ¹⁰Be等)含量变化的高频分量作为太阳活动变化的代用指标。宇宙成因核素是由宇宙线辐射与大气分子相互作用形成的, 其含量受太阳活动强度变化的调制。Solanki等^[15]根据中纬度地区树木年轮10年采样间隔的高精度¹⁴C资料分析获取的 $\delta^{14}\text{C}$ 记录, 给出了覆盖全新世的太阳黑子数(SSN)的重建结果。该数据在公元1600年之后的结果与实际观测有很好的—致性。虽然10年采样间

收稿日期: 2014年1月1日; 修回日期: 2014年3月14日
第一作者: 尹志强(1979—), E-mail: yinzhq@bao.ac.cn
资助信息: 国家重大科学研究计划项目(2012CB957801)

隔的数据不能用来分析太阳活动的高频波动，但足以分析百年及更长的周期性振荡。

2.2 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

从冰芯、有孔虫壳或石笋中获取的稳定的氧同位素比值 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) 记录被广泛用于古气候的研究。千年尺度变化的分析对数据的要求更为严格，我们需要更长时间跨度及更高分辨率的信息。根据Fleitmann等^[16]的分析报告，选取了两个高分辨率及较长时间跨度的低纬度 $\delta^{18}\text{O}$ 记录。其中，董哥 (Dongge) 洞 ($25^{\circ}17'\text{N}$, $108^{\circ}5'\text{E}$) 的数据被认为记录了过去9千年亚洲季风的信息，数据采样间隔从1年至10年不等，平均采样间隔为4年。该记录与大气 ^{14}C 记录的十年至百年尺度的互相关分析显示，该频率的一些季风变化被认为是由太阳活动的变化引起的^[1, 17]。为了便于进一步分析，我们利用分段3次Hermite方法对该数据做了内插处理，得到5年间隔的数据序列。另一个从阿曼北部与南部及也门的4个山洞的全新世石笋中获取的高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 数据，其提供了沿 12° — 23°N 方向的沉积作用的详细波动信息^[16, 18-19]。我们同样利用分段3次Hermite方法以10年分辨率对该数据做了内插处理。下文中这两个代用指标分别简称为Dongge及Qunf。图1绘出了所有数据的曲线，以展示强或弱的突变事件。

2.3 小波分析

为了估计一些数据频率的非平稳性，Morlet提出了小波变换。小波是一类用于对一给定的函数在空间及时间域上做局部化分析的函数。Morlet小波将三角函数与高斯函数相结合，通过时频域上的小波滤波，将时间序列的信号与噪声分离开。这样可以有效消除噪声的影响^[20-22]。我们在研究中利用小波变换的方法对上述代用指标的时变信息在时间及频率域上分别进行了估计。

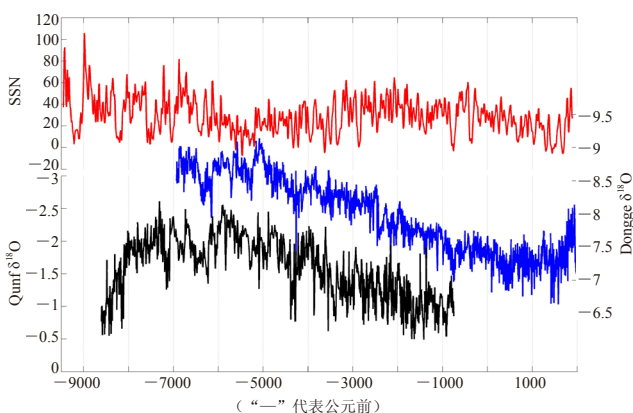


图1 SSN (红)、Dongge (蓝) 及Qunf (黑) 时间序列的变化曲线

3 结果及讨论

图2给出了SSN, Dongge及Qunf数据序列的小波变换结果。由于本文主要对百年及千年尺度长期波动的变化特征做研究，故把小波分析的周期范围选为64~4096年。小波图 (图2a, 2c, 2e) 中，背景置为白色，由蓝色至红色表示能量由低到高的变化。利用时间序列的协方差对小波功率做了归一化处理，以给出功率相对白噪声的大小。图2b, 2d, 2f分别给出了3个序列的全局小波谱。

图2a显示全新世期间SSN时间序列具有明显的长周期波动 (包括约220, 517, 1000及2000年等)。双世纪周期的变化在190~220年之间，千年周期长度的变化在900~1100年之间，2000年周期长度的变化幅度为2040~2400年。图2b的全局小波变换显示所有的周期都在置信水平以上。图2c—d显示Dongge时间数据具有类似的特征。Dongge序列的主要周期约为210, 567, 1000, 2320年。Qunf序列的分析显示其几个显著的周期约为: 1000, 1820及2400年 (如图2e—f)。几乎所有的 $\delta^{18}\text{O}$ 的主要变化周期与SSN的变化周期接近。

全新世的十年与百年尺度上的 ^{10}Be 及 ^{14}C 中的约90年的Gleisberg周期及约200年的Suess周期以及其他太阳活动的记录，同样很好地在环境代用指标记录中展现出来^[7, 23-28]。在百年及千年尺度上的小波分析显示SSN的约200年周期幅度较大的时段主要为公元前约8000—6000年间、公元前约4000—2700年间、公元前约700—500年间，以及公元1500年前后的几个时段内。

Dongge记录同样显示出约200年的周期 (图2c)。虽然该记录的谱分析显示出显著的208年及86年的太阳周期，且认为其受太阳驱动活动的影响^[17]，但局部小波功率谱分析显示该周期在Dongge与SSN数据中时间不一致 (图2a与2c)。图2e显示了Qunf序列的时变特征，我们发现在置信水平之上并不存在约200年周期 (图2f)。

上述的分析表明，约1000年及2000年的周期波动是SSN, Dongge及Qunf序列的更长期的变化特征，其都在置信水平之上。与其他波动相比，这些振荡似乎更加稳定。尤其是3个序列的约1000年周期几乎在整个时间跨度上一直存在。另外，Dongge的周期长度在公元前600年附近较短，在公元前2000年之后稍微变长。对Qunf记录，在公元前2000年之前，该周期长度更为稳定，随后稍微变短。这3个时间序列的局部小波功率谱显示，在公元前2000年附近，约1000年周期有明显的下降 (图2)。Debret等^[29]给出了 ^{14}C 含量^[10]

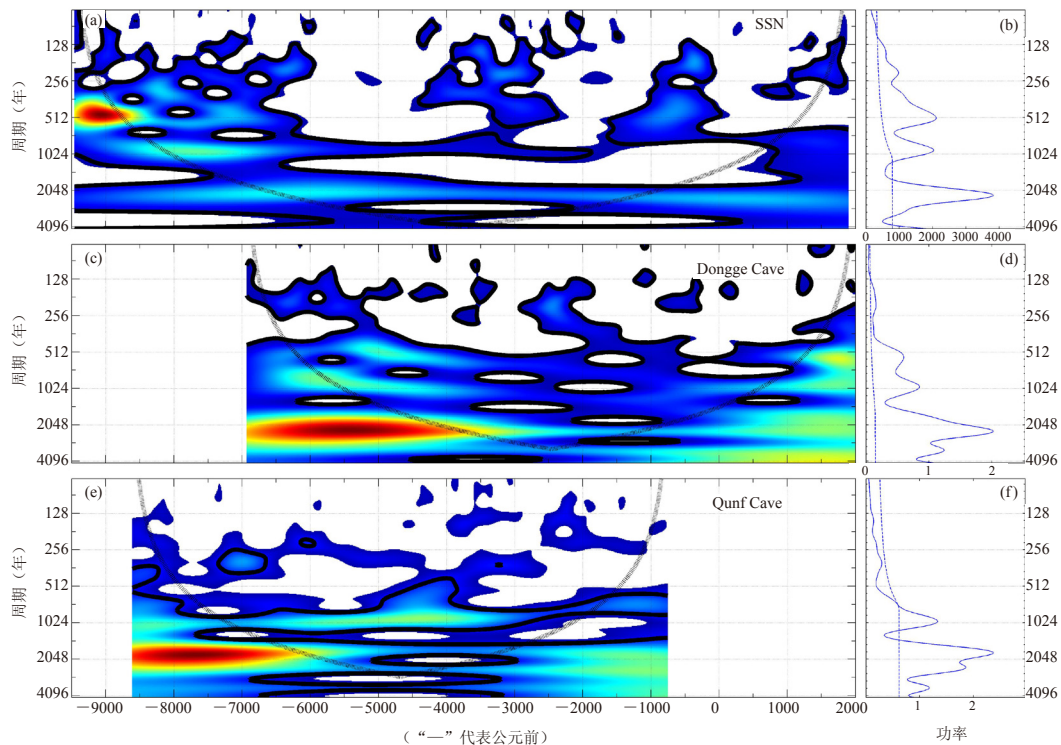


图2 SSN、Dongge及Qunf数据序列的小波变换。(a)、(c)、(e)分别为SSN、Dongge、Qunf时间序列的局部小波功率谱；黑色虚线为Morlet小波变换端部效应的边界，该边界以下的小波谱的可靠性较差；黑色实线为95%置信水平的置信线。(b)、(d)、(f)分别为SSN、Dongge、Qunf时间序列的小波全局功率谱，虚线为以白噪声为背景的95%置信水平的置信线

及 $^{10}\text{Be}^{[30]}$ 的类似分析结果，主要的约1000年周期同样在5000-0 B.P.呈现衰减。

为了展示这些序列的千年尺度波动，我们对每个时间序列做了归一化尺度平均小波功率谱，图3绘出了相应的结果（最大值为1，最小值为0）。千年尺度变化的小波尺度约为900~1100年。

由图3可以看到，Dongge及Qunf在千年尺度上有明显的相关性。公元前7000—1000年间，Dongge序列的波动幅度与Qunf非常一致。公元前8500—7000年间，SSN的千年准周期幅度相对较大，随后变小。虽然Dongge及Qunf的小波谱的平均能量似乎与SSN的相关性较差，它们在公元前2000年附近的最小值可能与

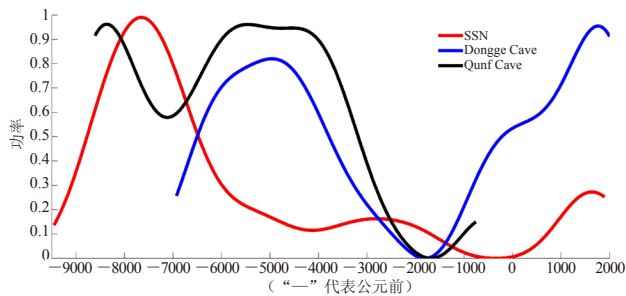


图3 SSN、Dongge及Qunf时间序列的归一化尺度平均小波功率谱

上述的SSN千年尺度缺失相关。

连续小波变换结果表明，在过去的11000年期间，连续的千年尺度振荡周期在1000~2000年左右。它们与在北大西洋发现的全新世约1500年周期不同^[9-10]。另外，除Dongge与Qunf记录的夏季日照的趋势性变化外，两数据记录的许多突变事件也与 ^{14}C 序列相关^[1, 16, 31]，我们的分析认为显著的约1000年波动以及由这两个记录获取的全新世约2000年波动可能来自于太阳活动的驱动。Debret等^[29]同样给出了北大西洋记录的类似结果。

4 结论

通过再分析的中低纬度山洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据序列，小波分析显示全新世气候的千年尺度的变化至少存在约一千年和约两千年的两个周期波动。我们的结果表明这两个周期可能由太阳活动驱动。虽然谱分析发现 $\delta^{18}\text{O}$ 记录呈现出显著的太阳活动百年峰值^[17]，然而小波分析显示它们在同一时间内与太阳活动周期并没有明显的相关性。从这一结果来看，全新世期间在千年尺度上，反应亚洲季风的 $\delta^{18}\text{O}$ 代用指标，ITCZ或印度夏季季风的平均纬度位置是由太阳活动驱动的。与百年尺度的变化相比，千年尺度可能是气候系统变

化的更基本的周期,这种波动很少受如复杂地形,地面覆盖,火山驱动及温室气体等其他因素的影响^[4]。考虑到在中纬度^[32]及高纬度^[29]各种气候代用指标发现的千年尺度太阳驱动^[33],我们认为这种影响可能不是一种局部特征,而是广泛地存在于整个气候系统。

致谢:感谢Solanki教授提供重建的太阳黑子数序列,同时感谢NOAA古气候项目提供替代数据。小波变换程序由C. Torrence及G. Comp开发,可通过如下链接获取:<http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>。

参考文献

- [1] Wang Y, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- [2] Rind D. The Sun's role in climate variations. *Science*, 2002, 296(5568): 673-667.
- [3] Bard E, Frank M. Climate change and solar variability: what's new under the Sun. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248(1-2): 1-14.
- [4] Wanner H, Beer J, Bütikofer J, et al. Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quat Sci Rev*, 2008, 27(19-20): 1791-1828.
- [5] Beer J, Mende W, Stellmacher R. The role of the sun in climate forcing. *Quat Sci Rev*, 2000, 19(1-5): 403-415.
- [6] Mayewski P A, Rohling E E, Stager J C, et al. Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 2004, 62(3): 243-255.
- [7] Versteegh G J M. Solar forcing of climate 2: evidence from the past. *Space Science Reviews*, 2005, 120(3-4): 243-286.
- [8] O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. *Science*, 1995, 270(5244): 1962-1964.
- [9] Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A Pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, 278(5341): 1257-1266.
- [10] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, 294(5549): 2130-2136.
- [11] Cumming B F, Laird K R, Bennett J R, et al. Persistent millennial-scale shifts in moisture regimes in western Canada during the past six millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(25): 16117-16121.
- [12] Viau A E, Gajewski K, Fines P, et al. Widespread evidence of 1500 yr climate variability in North America during the past 14000 yr. *Geology*, 2002, 30: 455-458.
- [13] Clemens S C. Millennial-band climate spectrum resolved and linked to centennial-scale solar cycles. *Quat Sci Rev*, 2005, 24(5-6): 521-531.
- [14] Bütikofer J. [Online] Available: http://www.giub.unibe.ch/klimet/docs/diplom_jbuetikofer.pdf (2014/1/1).
- [15] Solanki S K, Usoskin I G, Kromer B, et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 2004, 431: 1084-1087.
- [16] Fleitmann D, Burns S J, Mangini A, et al. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quat Sci Rev*, 2007, 26(1-2): 170-188.
- [17] Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1-2): 71-86.
- [18] Neff U, Burns S J, Mangini A, et al. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. *Nature*, 2001, 411: 290-293.
- [19] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman. *Science*, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- [20] Kumar P, Foufoula-Georgiou E. Wavelet analysis for geophysical applications. *Rev Geophys*, 1997, 35(4): 385-412.
- [21] Torrence C, Compo G. A Practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79(1): 61-78.
- [22] Yin Z Q, Ma L H, Han Y B, et al. Long-term variations of solar activity. *Chin Sci Bull*, 2007, 52(20): 2737-2741.
- [23] Mergentaler J. On the long-period changes of solar activity. *Acta Astronomica*, 1984, 34(2): 263-267.
- [24] 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(1-2), 371-394.
- [25] Ogurtsov M G, Jungner H, Kocharov G E, et al. On the link between northern fennoscandian climate and length of the quasi-eleven-year cycle in galactic cosmic-ray flux. *Sol Phys*, 2003, 218(1-2): 345-357.
- [26] Raspopov O M, Dergachev V A, Kolström T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2004, 209(1-4): 127-139.
- [27] Velasco V M, Mendoza B. Assessing the relationship between solar activity and some large scale climatic phenomena. *Advances in Space Research*, 2008, 42(5): 866-878.
- [28] Ma L H, Vaquero J M. Is the Suess cycle present in historical naked-eye observations of sunspots? *New Astronomy*, 2009, 14(3): 307-310.
- [29] Debret M, Bout-Roumzeilles V, Grousset F, et al. The origin of the 1500-year climate cycles in Holocene North-Atlantic records. *Clim Past*, 2007, 3(4): 569-575.
- [30] Vonmoos M, Beer J, Muscheler R J. Large variations in Holocene solar activity: constraints from ¹⁰Be in the Greenland Ice Core Project ice core. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, 111(A10): A10105.
- [31] Wang Y, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. *Nature*, 2008, 451: 1090-1093.
- [32] Nederbragt A J, Thurow J. Geographic coherence of millennial-scale climate cycles during the Holocene. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2005, 221(3-4): 313-324.
- [33] Usoskin I G, Solanki S K, Kovaltsov G A. Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints. *A&A*, 2007, 471(1): 301-309.