

曲维政, 黄 菲, 赵进平等. 太阳磁场方向变化对于地球大气温度异常变化的意义. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1304 ~ 1310  
Qu W Z, Huang F, Zhao J P, et al. The significance of solar magnetic field direction variation on anomalous variability of the atmosphere temperature on the earth. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(5): 1304 ~ 1310

# 太阳磁场方向变化对于地球大气温度异常变化的意义

曲维政, 黄 菲, 赵进平, 邓声贵, 刘应辰, 李淑江

中国海洋大学海洋环境学院, 青岛 266100

**摘 要** 本文根据苏黎世天文台太阳黑子 11 年周期资料和太阳黑子磁场磁性变化周期特征, 构建了太阳黑子磁场磁性指数 MI (Magnetic Index) 时间序列. 分析表明: 太阳活动磁性周期平均长度为 22.2 年, 但是每个周期长度是不相等的; 多数情况周期短时磁性指数较大, 对应太阳活动水平强; 周期变长时磁性指数较小, 对应太阳活动水平较弱; 太阳黑子磁场磁性指数序列也具有 80 ~ 90 年的世纪周期.

进一步研究指出, 太阳黑子磁场磁性指数曲线由极小值升至极大值时期, 太阳磁场南向, 行星际磁场磁力线与地磁场磁力线重联, 此时磁层为开磁层, 太阳风将携带大量等离子体从向阳面进入地球磁层, 从而使输入的动量、能量和物质大幅度增加, 与北半球对流层增温时期对应; 太阳黑子磁场磁性指数曲线由极大值下降至极小值时期, 太阳磁场北向, 与磁层顶地磁场同向, 行星际磁场不会与地磁场发生重联, 此时磁层为闭磁层, 这种情况下, 只有少数带电粒子能够穿越磁力线进入地球磁层, 与北半球对流层降温时期对应.

**关键词** 太阳活动, 磁性指数, 22 年周期, 太阳磁场方向

文章编号 0001-5733(2007)05-1304-07

中图分类号 P461

收稿日期 2006-02-02, 2007-05-09 收修定稿

## The significance of solar magnetic field direction variation on anomalous variability of the atmosphere temperature on the earth

QU Wei-Zheng, HUANG Fei, ZHAO Jin-Ping, DENG Sheng-Gui,

LIU Ying-Chen, LI Shu-Jiang

*Ocean Environment College of China Ocean University, Qingdao 266100, China*

**Abstract** In this paper, based on the 11-year's period data of the sunspot and the periodic variation characteristics of the magnetic field of the sunspot, the time series of the magnetic index of the sunspot magnetic field (MI) is established. The analysis indicates that the averaged period of the solar magnetic activity is about 22.2 years, but it is not a constant. In most cases, when the period is short the magnetic index is large, corresponding to strong solar activity; when the period is long the magnetic index is small, corresponding to weak solar activity. The time series of the magnetic index of the sunspot magnetic field also possesses a period of 80 ~ 90 years.

Further study shows that during the period of MI curve rising from its minimum to its maximum, the solar magnetic field is southward, and the planetary magnetic force lines and the earth magnetic force lines meet together. In this way the magnetic layer is called open layer, with the solar wind carrying a large amount of plasma and entering into the earth magnetic layer from the sunny side of the earth. Through this mechanism a large amounts of kinetic energy, heat and electromagnetic energy are then transferred to the earth, which

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40631006, 40475033)资助.

**作者简介** 曲维政, 男, 1945 年生, 毕业于北京气象学院大气科学系, 中国海洋大学教授, 主要从事气候异常变化和短期天气预报研究.

E-mail: quweizhe@ouc.edu.cn

corresponds to the temperature increasing period in the troposphere in the Northern Hemisphere. During the period of MI curve descending from its maximum to its minimum, the solar magnetic field is northward, the same direction as the top of the magnetic layer, and the planetary magnetic force lines and the earth magnetic force lines do not meet together. In this situation the magnetic layer is called close layer, with only a few electriferous particles entering into the earth magnetic layer through magnetic force lines, corresponding to the temperature decreasing period in the troposphere in the Northern Hemisphere.

**Key words** Solar activity, Magnetic index, 22-year's period, Solar magnetic field direction

## 1 引言

1843 年德国海因里希·施瓦布 (H. Sanuel Schwabe) 宣称, 在太阳圆面上看到的黑子数似乎呈现大约 10 年周期的规则变化。施瓦布太阳黑子周的发现, 引起了苏黎世天文台台长沃尔夫 (J. Rudolf Wolf) 的注意, 他根据每天从国际观测者网络报来的黑子数和 150 年的太阳黑子数历史资料进行了深入系统地分析研究, 于 1852 年发现太阳黑子周大约有一个校正后的 11.1 年的平均周期, 尽管各黑子周的周期和振幅均有较大差异<sup>[1]</sup>。由于太阳黑子这种有规律的准周期性变化, 人们一般以太阳黑子相对数作为太阳活动指标, 把太阳活动与地球物理现象相联系, 尤其与旱涝灾害和气候变化相联系, 发现了许多意义清楚的相关关系<sup>[2-5]</sup>。

近代日地关系研究可以说是从黑子活动周期发现之后才开始的。20 世纪 80 年代以前, 黑子活动的研究主要集中于黑子数的周期分析, 得到黑子活动的 5.5、8.1、9.7、11.2 年以及 100 年和 180 年的周期。而地球物理现象与黑子数的相关研究方面, 则主要是寻找与黑子数相同的周期性以及两者的位相差, 寻求地磁活动与黑子活动的相关<sup>[6,7]</sup>。

太阳黑子具有比太阳初始磁场高出千百倍的强大磁场, 有磁极, 并且磁性变化存在准 22 年循环周期。美国加州威尔逊山天文台的 G. E. 海尔 (George Ellery Hale) 及其同事亚当斯 (W. S. Adams) 在测量太阳黑子光谱时发现了太阳磁场的振荡, 并测出太阳黑子周的磁场强度为 2000 ~ 3000 Gs 之间, 比地球磁场要强数千倍。他们也发现大多数黑子以成对的集团出现, 这很类似于硕大的磁偶极子磁棒, 其取向通常大致平行于太阳赤道。Hale 1921 年宣称, 在这一年开始的太阳新活动周的第一批黑子中, 这类太阳黑子偶极子的磁极性已经改变了方向。到 1924 年他收集了足够的观测资料后指出, 磁极性方向的改变出现于每个活动极小期, 而且是太阳黑子周的一

个基本特征。他认为太阳黑子数的 11 年周期, 实际上是 22 年太阳磁周的一半, 太阳黑子群的磁极性在磁周中倒转两次, 因而又恢复到它原来的状态<sup>[8]</sup>。这种 22 年周期又称为海尔 (Hale) 周期。

在最近关于海洋大气系统年代际气候变率分析中相继发现了大气中<sup>[9-11]</sup>和赤道东太平洋深海温度中<sup>[12]</sup>存在十分清楚的 22 年变化周期, 进一步分析还证明北大西洋、南大西洋和印度洋深海也存在显著的 22 年振荡周期。22 年变化周期在赤道东太平洋表层水温中虽然不像深海中那样清楚, 但是仍然隐约可见。

大气气候中的 22 年变化周期高空比低空清楚。1948 ~ 2000 年 NCEP 大气温度资料谱分析结果显示, 南北半球平流层 10 hPa 温度占绝对优势的年代际变化周期就是 22 年周期。22 年变化周期盛行于全球高、中、低各个纬度带, 高纬度比低纬度更显著<sup>[13,14]</sup>。

太阳活动对地球海洋大气系统和天气气候可能通过两条途径产生影响, 一方面通过太阳辐射的异常变化对天气气候产生影响, 一方面通过激发充满了地球整个空间的地球磁场异常 (包括地球磁场强度和磁场位形以及与地球磁场变化密切相关的地球电场系统的相应变化) 而导致大气运动状态和海洋运动状态变化, 两条途径都与太阳磁场的变化密切相关。

显然, 这两方面的研究已经获得许多观测事实和相关关系, 这些结果让我们看到了太阳活动对气候和海洋大气系统若干方面的影响是真实存在的<sup>[15-24]</sup>, 也让我们看到了这些关系中的不确定性。这种不确定性产生的重要原因之一在于海尔周期的定性表述, 太阳活动这种磁场强度及其磁性变化过程缺乏数字表征, 难以采用数学方法研究它与诸多地球物理现象之间的联系, 更不可能从机制方面进行探索。为此, 本文拟参照太阳黑子相对数的形式和磁性变化特点构建太阳黑子磁场磁性指数, 建立太阳黑子磁性指数时间序列。

虽然说盛行于海洋大气系统中的 22 年左右变化周期与太阳活动 22 年磁性周期之间的联系是显而易见的,可是目前还没有一个明确的理论能阐明二者直接相联系的性质.本文所建立的太阳黑子磁场磁性指数时间序列,借助 20 世纪 50 年代以来太阳物理研究和空间物理研究新成果<sup>[25~28]</sup>,把太阳黑子磁场磁性周期和太阳磁场极性循环相联系,虽然二者概念不同,但是循环周期相同.这样,就把年代不长的太阳磁场极性循环观测资料,通过太阳黑子磁场磁性指数时间序列得以数十倍地延长.更为有意义的是,太阳磁场,以及发源于太阳磁场的行星际磁场作用于地球磁层时所产生的两种形态:太阳磁场南向或者说行星际磁场南向时,在磁层顶日下点处行星际磁场与地磁场反向,造成的吞并和重联,使地球磁层成为开磁层,太阳风将携带大量等离子体从向阳面沿磁力线进入地球磁层,从而使输入的动量、能量和质量大幅度增加;太阳磁场北向,与磁层顶地磁场同向,行星际磁场不会与地磁场发生重联,此时磁层为闭磁层.这种情况下,太阳风通过黏性作用,只有少数带电粒子能够穿越磁力线进入地球磁层.地球磁层这两种形态取决于太阳磁场方向变化,太阳黑子磁场磁性指数时间序列能够将太阳磁场方向变化和磁场强度变化基本表示出来,使我们得以利用较长资料对比研究太阳活动和太阳磁场方向变化对于地球气候和地球物理现象的影响.正如后面第 4 节的分析,我们其实开始了关于太阳活动对于地球气候影响方式的研究.

## 2 太阳磁场磁性指数时间序列的建立

太阳活动 11 年周期的大致过程是:在每个 11 年周期开始时,少量黑子首先在太阳南北赤道 40°~30° 出现,处于黑子群前面的一个较大黑子称为前导黑子,为 N 极,处于后面一个较大黑子称为尾随黑子,为 S 极(太阳南半球前导黑子为 S 极尾随黑子为 N 极).此时黑子面积小,磁场最弱,在以后向赤道移动过程中黑子数增加,黑子面积也增加,磁场增强.当移动到南北赤道 20°~10° 时,黑子相对数达到最大,黑子面积也达到最大,磁场达到最强.此后黑子数逐年减少面积减少磁场减弱,大约到南北赤道 5° 时,黑子消失,趋近于零,磁场恢复为约 5 Gs 的太阳初始磁场.与此同时,在南北赤道 40°~30° 又有小黑子群出现,只是处于黑子群前面的前导黑子变为 S 极,处于后面尾随黑子变为 N 极(太阳南半球前导

黑子为 N 极尾随黑子为 S 极),即黑子极性反转,然后重复上述 11 年周期过程.所以从磁极变化来看,黑子的磁性周期为 11 年周期的两倍,即 22 年周期.

如果令太阳北半球中纬度 50°~30° 前导黑子为 N 极时的黑子相对数取正“+”号,前导黑子为 S 极时的黑子相对数取负“-”号,则由带有正、负号的太阳黑子相对数序列就可以反映出太阳黑子磁性周期变化.我们把带有正、负号的太阳黑子相对数称为太阳黑子磁场磁性指数,用 MI (Magnetic Index) 表示.由太阳黑子磁性指数构成的时间序列称为太阳黑子磁场磁性指数时间序列,用 MI(*i*) 表示,其中 *i* 为时间序号.

根据黑子最大场强  $B_m$  与黑子相对数  $R$  的经验关系式<sup>[29]</sup>:

$$B_m = 3700 \frac{R}{R + 3.6},$$

太阳磁场强度随着黑子相对数的增加而增强,所以太阳黑子相对数在一定程度上反映了太阳磁场强度的变化,从而太阳黑子磁场磁性指数序列不仅标明了黑子磁场磁性的变化,也一定程度上标明了太阳磁场强度的变化.

根据苏黎世天文台太阳黑子 11 年周期资料,第 1 周从 1755 年 2 月开始,并且以 N 极前导,至 1766 年 4 月结束;第 2 周从 1766 年 5 月开始,以 S 极为前导,至 1775 年 4 月结束,依次排列以后各周期.根据上述太阳黑子磁性周期特征,磁性周期第 1 周也是从 1755 年 2 月开始,历经两个黑子周(20 年零 3 个月),至 1775 年 4 月结束.依次排列以前和以后各磁性周期,列于表 1.

## 3 太阳黑子磁场磁性指数时间序列周期特征分析

由表 1 可见,从 1619~2003 年这 385 年中,太阳黑子磁场磁性指数变化经历了将近 18 个周期,所以磁性周期平均长度为 22.2 年.但是每个周期长度是不相等的,而且按两个 N 极大值确定的周期长度和按两个 S 极大值确定的周期长度是有差别的,说明极大值相对位置是常常改变的.按两个 N 极大值确定的周期长度最长可达 26 年零 10 个月,最短仅为 17 年;按两个 S 极大值确定的周期长度最长可达 28 年零 3 个月,最短仅为 18 年零 3 个月.可见,所谓 22 年周期是统计平均意义上的周期,而非严格的物理周期.

表 1 太阳黑子磁性周期表  
Table 1 Magnetic cycle of sunspot

周期序号	周期起止年.月	周期长度(年.月)	MI 绝对值周期平均值	MI N 极大值年月	MI S 极大值年月
- 5	1619.1 ~ 1645.1	26.01		1626.1	1639.7
- 4	1645.2 ~ 1665.12	20.11		1649.1	1660.1
- 3	1666.1 ~ 1689.4	23.03		1675.1	1685.1
- 2	1689.5 ~ 1711.12	22.07		1693.1	1705.5
- 1	1712.1 ~ 1733.12	21.11		1718.2	1727.5
0	1734.1 ~ 1755.1	21.01		1738.7	1750.3
1	1755.2 ~ 1775.4	21.03	47.9	1761.5	1769.7
2	1775.5 ~ 1798.2	22.09	63.5	1778.4	1788.1
3	1798.3 ~ 1823.2	25.00	20.7	1805.2	1816.4
4	1823.3 ~ 1843.4	20.02	52.6	1829.9	1837.2
5	1843.5 ~ 1867.1	23.10	52.4	1848.1	1860.1
6	1867.2 ~ 1889.5	22.04	46.2	1870.6	1883.9
7	1889.6 ~ 1913.5	25.00	33.6	1894.1	1907.1
8	1913.6 ~ 1933.7	20.02	42.5	1917.6	1928.4
9	1933.8 ~ 1954.4	21.09	69.6	1937.4	1947.5
10	1954.5 ~ 1976.5	22.01	74.7	1957.9	1968.9
11	1976.6 ~ 1996.8	20.03	78.3	1979.7	1989.6
12	1996.9 ~			2000.7	2010.8

丹麦气象学家 Friis-Christensen 采用太阳黑子周期长度作为显示太阳长期变化的参数. 已知这个参数随太阳活动而变化, 即当活动水平强时, 对应短的太阳周期; 反之, 当活动水平弱时, 对应长的太阳周期<sup>[7]</sup>. Gleissberg 证明存在一种 80~90 年为特征的长期变化, 即所谓 Gleissberg 周期<sup>[6]</sup>, 也称世纪周期. Friis-Christensen 等发现, 若用太阳黑子周期长度代表太阳活动, 则北半球温度与太阳活动的相关比用

太阳黑子数还要好. 本文仿照这种做法, 考察太阳黑子磁场磁性指数周期长度与太阳活动强度的关系. 表 1 第 3 列为磁性周期长度, 第 4 列为按周期平均的太阳黑子磁场磁性指数 MI 绝对值的月平均值, 对比这两列数据可以看到多数情况是周期短时磁性指数较大, 对应太阳活动水平强; 周期变长时磁性指数较小, 对应太阳活动水平较弱.

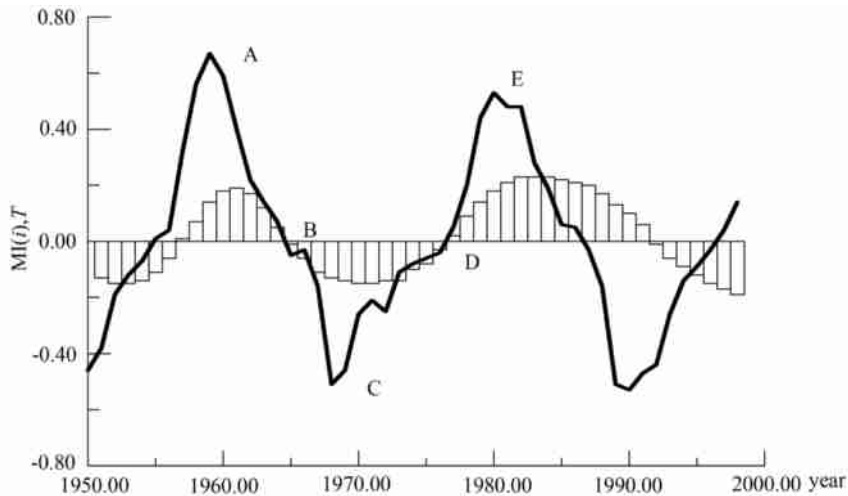


图 1 北半球对流层中部 1 月 400 hPa 大气温度  $T$  距平值 5 年的滑动平均柱线 (滤除趋势项) 和太阳黑子磁场磁性指数 MI 1 月 5 年的滑动平均曲线 (除 300, 粗黑线)

Fig. 1 The magnetic index of the sunspot (divided by 300, thick line) and the 5-year running mean temperature anomaly curve at 400 hPa in the Northern Hemisphere in January (histogram)

图 1 中黑线为 1950~2000 年 1 月月平均太阳黑子磁场磁性指数变化曲线. 由表 1 数据和图 1 可见, 各个 22 年磁周峰值和谷值高低不一, 同样有显著振

动. 若按月平均值而论 (取其绝对值), 峰 (谷) 值可由 62.3 变化到 253.0, 可见波动幅度之大.

由表 1 可以看到, 第 1 个短周期 (20 年 11 个月)

从第 - 4 磁周开始到第 2 个短周期 (0 磁周 21 年零 1 个月), 经历了 4 个磁周 89 年零 2 个月; 第 2 个短周期从第 0 磁周开始到第 3 个短周期 (4 磁周 20 年零 2 个月), 经历了 4 个磁周 89 年整; 第 3 个短周期从第 4 磁周开始到第 4 个短周期 (第 8 磁周 20 年零 2 个月), 经历了 4 个磁周 89 年零 3 个月。所以平均而言, 太阳黑子磁场磁性指数序列也具有 80 ~ 90 年的世纪周期。

#### 4 太阳黑子磁场磁性指数 MI 变化所反映的太阳磁场变化及其地球气候效应

太阳物理学和日地空间物理学研究<sup>[25-28]</sup>证明, 在太阳南北两半球极区, 大尺度磁场极性是相反的, 类似偶极子场, 但随太阳活动 11 年周期改变极性, 因此有 22 年左右周期变化。在黑子周的前半周里, 高纬度偶极群的后随部分磁场逐渐向极区扩散, 因与所在半球极区的磁极性相反, 就不断与极区磁场中和而使极区磁场减弱。在黑子周的黑子数达到极大时, 极区磁场会全部中和, 开始了极区的极性反转。以图 1 为例说明这个过程及其气候效应: 太阳北半球黑子群 N 极前导时期, 黑子数达到极大之前, 太阳北极区为磁 N 极, 太阳磁场南向。黑子周的黑子数达到极大时, 即图 1 中的 A 点, 极区磁场全部中和, 开始由磁 N 极转为磁 S 极, 此时太阳南半球极区磁场由磁 S 极转为磁 N 极, 磁力线由太阳南半球极区发出在北半球极区进入, 就是说太阳磁场开始转为北向, 与此同时北半球对流层气温距平曲线也由极大值开始转为下降; 黑子群由 N 极前导转为 S 极前导之后, 太阳黑子磁性指数 MI 曲线由正值转为负值, 图 1 中的 B 点为转折点 (MI 0 值点), 曲线继续下降, 太阳磁场方向不变。黑子群 S 极前导时期黑子数达到极大 (图 1 中的 C 点) 之前, 太阳北极区仍为磁 S 极, 太阳磁场仍为北向。这样, 太阳磁场磁性指数曲线由极大值 A 点下降至极小值 C 点时期, 太阳磁场北向, 与磁层顶地磁场同向, 太阳磁场或者说行星际磁场不会与地磁场发生重联, 此时磁层为闭磁层, 磁层磁力线的两端与地球相遇。这种情况下, 只有少数带电粒子能够穿越磁力线进入地球磁层, 与北半球对流层降温时期对应 (见图 1), 就是说与 MI 曲线持续下降相对应, 北半球对流层气温距平曲线也由极大值持续下降到极小值; 反之, 黑子周的黑子数达到极大时, MI 曲线下降到极小值, 即图 1 中的 C

点, 极区磁场全部中和, 开始由磁 S 极转为磁 N 极, 此时太阳南半球极区磁场由磁 N 极转为磁 S 极, 磁力线由太阳北半球极区发出在南半球极区进入, 就是说太阳磁场开始转为南向, 与此同时北半球对流层气温距平曲线也由极小值开始转为上升; 黑子群由 S 极前导转为 N 极前导之后, 太阳黑子磁性指数曲线由负值转为正值, 图 1 中的 D 点为转折点 (MI 0 值点), 曲线继续上升, 太阳磁场方向不变。黑子群 N 极前导时期黑子数达到极大 (图 1 中的 E 点) 之前, 太阳北极区仍为磁 N 极, 太阳磁场仍为南向。这样, 太阳磁场磁性指数曲线由极小值 C 点上升至极大值 E 点时期, 太阳磁场南向, 与地球磁层顶处地磁场反向, 在太阳风压力作用下, 行星际磁场磁力线与地磁场磁力线相连接, 即造成磁场吞并和重联, 产生 X 型中性点。此时磁层为开磁层, 磁层磁力线的两端分别与地球和太阳相遇。重联发生后, 太阳风将携带大量等离子体从向阳面进入地球磁层, 从而使输入的动量、能量和质量大幅度增加, 与北半球对流层增温时期对应 (见图 1), 磁暴和磁亚暴大多也发生在这一条件下。地球磁场分布为南北两极强, 赤道附近弱, 是一个天然磁捕集器。它能使进入地球磁场的带电粒子在南北极之间环绕地磁场磁力线往返作螺旋运动而辐射电磁波, 加热高层大气。这一区域叫范·阿仑辐射带, 它有两层, 内层在距离地面高为  $(1 \sim 2) R_E$  ( $R_E$  为地球半径) 处, 外层在  $(3 \sim 4) R_E$  处。部分粒子沿磁力线沉降到极区电离层和高层大气, 产生极光, 形成亚暴集电流, 并引起地磁场剧烈扰动。所以激发地球物理事件的两个重要条件是: 携带足够能量的高速太阳风和行星际磁场 (MIF) 即太阳磁场的南向分量。上述对比分析显示出太阳磁场方向变化对北半球对流层气温距平符号变化的重要影响, 说明北半球对流层气温中所蕴涵的显著的 22 年周期乃太阳活动所激发<sup>[29]</sup>, 是北半球对流层气温对太阳磁场强度变化和磁场磁性变化的响应。图 1 中气温变化曲线并不像太阳磁场磁性周期曲线那样规则, 还有一些较小的波动偏离磁性变化曲线, 这是由于除了太阳活动之外, 北半球对流层气温变化还受到其他一些因素的影响, 只是其影响程度都远小于太阳活动。如上分析可知, 蕴涵于北半球对流层气温中的 22 年变化周期乃太阳活动所激发, 是北半球对流层气温年代际变化重要影响因子。

#### 5 小结

根据苏黎世天文台太阳黑子 11 年周期资料和

太阳黑子磁场磁性变化周期特征, 构建了太阳黑子磁场磁性指数时间序列, 用  $MI(i)$  表示. 分析表明:

(1) 太阳活动磁性周期平均长度为 22.2 年, 但是每个周期长度是不相等的;

(2) 多数情况周期短时磁性指数较大, 对应太阳活动水平强; 周期变长时磁性指数较小, 对应太阳活动水平较弱;

(3) 太阳黑子磁场磁性指数序列也具有 80~90 年的世纪周期;

(4) 太阳黑子磁场磁性指数曲线由极小值升至极大值时期, 太阳磁场和行星际磁场南向, 在向阳面, 行星际磁场磁力线与地磁场磁力线重联, 地球磁层为开磁层, 太阳风携带大量等离子体沿磁力线进入地球磁层, 从而使输入的动量、能量和质量大幅度增加, 导致地球大气增温; 太阳黑子磁场磁性指数曲线由极大值下降至极小值时期, 太阳磁场北向, 行星际磁场磁力线与地磁场磁力线不能重联, 地球磁层为闭磁层, 只有少数带电粒子能够穿越磁力线进入地球磁层, 导致地球大气降温.

#### 参考文献 (References)

- [1] 约翰·格里宾. 大宇宙百科全书. 黄磷译. 海口: 海南出版社, 2001. 379~381  
John Gibbin. Companion to the Cosmos (in Chinese). Huang L trans. Haikou: Hainan Press, 2001. 379~381
- [2] 洪业汤. 太阳变化驱动气候变化研究进展. 地球科学进展, 2000, 15(4): 400~406  
Hong Y T. Progress in study on relationships between solar variability and climate change. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2000, 15(4): 400~406
- [3] 徐群, 金龙. 太阳活动与北半球中纬度 30—50 度副热带高压强度的耦合振荡. 大气科学, 1986, 10(2): 204~211  
Xu Q, Jin L. The coupled oscillation of solar activity with the strength of subtropical high in northern hemisphere. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1986, 10(2): 204~211
- [4] 王绍武. 90 年大气环流的振动. 气象学报, 1964, 34(4): 486~506  
Wang S W. Vibration of atmospheric circulation in 90s. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1964, 34(4): 486~506
- [5] 赵振国. 我国汛期旱涝趋势预测进展. 陶诗言主编. 气候预测研究. 北京: 气象出版社, 1996. 84~93  
Zhao Z G. The drought suffers from waterlogging trend prediction develops in flood season in our country. Tao S Y ed. *The Study of Climate Prediction* (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1996. 84~93
- [6] 王家龙. 日地系统学中的太阳活动研究( ) 日地系统物理学中缓变型太阳活动的研究. 地球物理学进展, 1994, 9(3): 1~11  
Wang J L. Study of solar activities in solar terrestrial systematology (I): Study of gradual solar activities. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 1994, 9(3): 1~11
- [7] Friis-Christensen E, Lassen K. of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, 1991, 254: 698~700
- [8] 冯松, 汤懋苍. 2500 多年来的太阳活动与温度变化. 第四纪研究, 1997, 9(1): 28~37  
Feng S, Tang M C. The solar activity and air temperature fluctuation in recent 2500 years. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 1997, 9(1): 28~37
- [9] 崔秋文, 陈英方, 陈长林. 地磁场研究与应用. 国际地震动态, 2001, 6: 8~12  
Cui Q W, Chen Y F, Chen C L. Research on geomagnetic field and its application. *International Earthquake Trends* (in Chinese), 2001, 6: 8~12
- [10] 丛友滋, 韩国忠, 王慧艳. 5000a B. P 以来地磁场要素时空变化特征及其与环境变化关系的讨论. 黄渤海海洋, 1995, 13(3): 20~26  
Cong Y Z, Han G Z, Wang H Y. Discussion about characteristics of geomagnetic field elements spatio-temporal changes and their relations to environmental changes since 5000a B. P. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas* (in Chinese), 1995, 13(3): 20~26
- [11] 贾英东, 李毅, 王水等. 磁场重联中离子轨道的混合模拟研究. 地球物理学报, 2003, 46(2): 145~152  
Jia Y D, Li Y, Wang S, et al. Hybrid simulation of particle acceleration caused by magnetic reconnection. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(2): 145~152
- [12] 乐贵明, 叶宗海, 龚菊红等. 银河宇宙线对 1991 年 3 月日冕物质抛射的监测. 地球物理学报, 2003, 46(2): 139~144  
Le G M, Ye Z H, Gong J H, et al. The monitor of the CME in March 1991 by cosmic rays. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(2): 139~144
- [13] 曹晋滨, 马志伟, 路立等. 行星际磁场  $B_y$  分量对地球磁层顶场向电流调制. 地球物理学报, 2003, 46(2): 156~167  
Cao J B, Ma Z W, Lu L, et al. Influence of interplanetary magnetic field by  $B_y$  on the field-aligned current in the magnetopause. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(2): 156~167
- [14] 安振昌. 2000 年中国地磁场及其长期变化冠谱分析. 地球物理学报, 2003, 46(2): 68~72  
An Z C. Spherical cap harmonic analysis of the geomagnetic field and its secular variation in China for 2000. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(2): 68~72
- [15] 尚社平, 郭兼善, 史建魁等. 不同地磁扰动事件期间全球电离层的扰动形态分析. 地球物理学报, 2003, 46(1): 11~17  
Shang S P, Guo J S, Shi J K, et al. Morphologies of global ionospheric disturbances during different type geomagnetic disturbance events. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(1): 11~17
- [16] 王童文, 冯学尚. 1998 年 5 月空间天气大事件的地磁响应. 空间科学学报, 2001, 21(2): 159~164  
Wang T W, Feng X S. The geomagnetic response of May 1998 event. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2001, 21(2): 159~

- 164
- [17] 刘勇华,刘瑞源,扬少凤等. 2000年7月重大太阳事件的极隙区纬度观测研究. 极地研究, 2001, **13**(3): 205~212  
Liu Y H, Liu R Y, Yang S F, et al. Study and observation of the great solar event in July of 2000 at cusp latitude. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 2001, **13**(3): 205~212
- [18] 刘绍亮,李立文. 南向行星际磁场事件与磁暴关系的研究. 地球物理学报, 2002, **45**(3): 297~305  
Liu S L, Li L W. Study on relationship between southward IMF events and geomagnetic storms. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(3): 297~305
- [19] 朱立平,陈玲,张平中. 环境磁学反映的藏南沉错地区1300年来冷暖变化. 第四纪研究, 2001, **21**(6): 520~527  
Zhu L P, Chen L, Zhang P Z. Cold/warm fluctuations of the last 1300 years reflected by environmental magnetism in the Chen Co area, Southern Tibet. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2001, **21**(6): 520~527
- [20] Bond GB, Kromer J, Beer, et al. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2002, **ACL** 7-1: 2130~2136
- [21] 王家龙,孙静. 太阳活动及其对地球环境的影响. 第四纪研究, 2002, **22**(6): 510~524  
Wang J L, Sun J. Solar activities and their effects on terrestrial environments. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2002, **22**(6): 510~524
- [22] 续春荣,林云芳. 地球磁场对太阳风的加卸载响应与川滇中强地震. 中国地震, 1998, **14**(2): 190~196  
Xu C R, Lin Y F. Upload and download response of the earth magnetic field to solar wind and mid to strong earthquake in Sichuan and Yunnan provinces. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1998, **14**(2): 190~196
- [23] 曾小苹,续春荣,赵明等. 地球磁场对太阳风的加卸载响应与地震. 地震地磁观测与研究, 1996, **17**(1): 49~53  
Zeng X P, Xu C R, Zhao M, et al. The load-unload response of geomagnetic field to solar wind and earthquake prediction. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* (in Chinese), 1996, **17**(1): 49~53
- [24] Eddy J A. The maunder minimum. *Science*, 1976, **192**: 1189~1202
- [25] 刘振兴. 太空物理学. 王大珩,张厚英主编. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005. 326~327  
Liu Z X. Outer Space Physics (in Chinese). Wang D H, Zhang H Y eds. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005. 326~327
- [26] 张元东,王家龙. 太阳风暴. 秦大河主编. 北京: 气象出版社, 2003. 47~48  
Zhang Y D, Wang J L. Solar Storm (in Chinese). Qin D H eds. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 47~48
- [27] 徐文耀. 地磁学. 徐文耀主编. 北京: 地震出版社, 2003. 410~411  
Xu W Y. Geomagnetism (in Chinese). Xu W Y eds. Beijing: Seismological Press, 2003. 410~411
- [28] 李喜先. 茫茫太空. 李喜先主编. 长沙: 湖南师范大学出版社, 2001. 23~24  
Li X X. Boundless Outer Space (in Chinese). Li X Y eds. Changsha: Hunan Normal University Press, 2001. 23~24
- [29] 曲维政,邓声贵,黄菲等. 太阳磁场磁性指数异常变化对北半球中纬度气候的影响. 地球物理学报, 2004, **47**(3): 398~404  
Qu W Z, Deng S G, Huang F, et al. The influence of magnetic index abnormal change in solar magnetic field on climate at middle latitude of North Hemisphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(3): 398~404

(本文编辑 何燕)