

# 北太平洋年代际涛动与太阳活动的联系\*

曲维政 黄菲 赵进平 贾英莱 李春 岳淑红

(中国海洋大学海洋环境学院 青岛 266100)

**提要** 采用逐次滤波法分析了北太平洋海洋大气系统年代际振荡特征及其主要影响因子,探索太阳活动对于北太平洋海洋大气系统年代际变化的影响。结果表明,太阳活动是北太平洋海洋大气系统周期性年代际振荡的重要影响因子,具体反映在:1)北太平洋年代际涛动(*PDO*, Pacific Decadal Oscillation)存在与太阳活动密切相关的 22 年周期和 11 年周期,是 *PDO* 仅次于趋势项最重要的周期成分,其方差贡献率分别为 20.9%和 6.7%。研究发现北太平洋年代际涛动变化对于太阳活动的响应方式与太阳活动强弱程度有联系,太阳活动水平强时 *PDO* 与太阳磁场变化符号相同并且振荡幅度大;太阳活动水平弱时 *PDO* 与太阳磁场变化符号相反并且振荡幅度小。2)滤除持续下降趋势之后,北太平洋冬季阿留申低压活动区海平面气压(*SLP*, Sea Level Pressure)表现出与太阳磁场磁性指数(*MI*, Magnetic index)基本反相的周期性振荡,滤除 22 年周期之后 11 年周期也比较清楚,其方差贡献率分别为 13.4%和 1.1%。3)滤除持续升温趋势以后北太平洋 100hPa 冬季大气温度距平场表现出与太阳磁场磁性指数基本一致的周期性振荡,滤除 22 年周期之后 11 年周期也比较清楚,其方差贡献率分别为 15.1%和 1.1%。研究结果说明,在太阳活动对于大气温度场的影响过程中,黑子磁场磁性变化是决定性的,即决定了温度变化符号,*MI* 绝对值的变化即太阳磁场强度变化影响其量变。

**关键词** 太阳活动,太阳磁场磁性指数,北太平洋年代际涛动

**中图分类号** P731.1

太平洋年代际涛动,是发生于北太平洋海洋大气系统中的大尺度低频振荡(Hare,1996, Mantua *et al.*, 1997)。由于北太平洋及其周边区域许多海洋大气过程和气候事件均一定程度上与 *PDO* 暖位相或者冷位相相联系,甚至北半球大气环流异常也受到其状态变化影响(Mantua *et al.*, 1997; Hare *et al.*,2000; Latif *et al.*, 1996; Bond *et al.*, 2000; 李崇银等, 2003; 朱益民等, 2003; Masuda, 2002),所以 *PDO* 已经被作为许多现象年际变化背景场加以研究和探索,研究其周期成分和冷暖稳定态循环规律,探索其振荡起源和发生机制。

到目前为止,关于 *PDO* 周期成分和冷暖稳定态循环规律研究结论基本一致,多数认为北太平洋海洋大气系统年代际周期变化显著,具有 15—25 年和 50—70 年两个显著周期,以及 20 世纪以来的两个冷

暖稳定态循环:1890—1924 年及 1947—1976 年的 *PDO* 冷期;1925—1946 年及 1977 年至今的暖期(Shoshiro *et al.*, 2000; Minobe, 1999; 程军等, 2004; 秦剑等, 2004)。至于 *PDO* 振荡起源和发生机制的探索则呈多元化格局,其中主要有:1)年代际时间尺度变率是大气内在低频动力学变化过程产生的随机风应力涡度在海洋罗斯贝(Rossby)波上积累的结果,是阿留申低压的变化启动了这些年代际信号(Schneider *et al.*, 2002);2)海洋模式模拟结果表明,1976 年 SST 突变信号起源于热带南太平洋次表层温度异常,即二者是通过大气遥相关和海洋遥相关发生关联(Giese *et al.*, 2002);3)温、盐资料分析发现,20 世纪 70 年代以来,把热带海洋与副热带相联系的经向环流翻转(Meridional Overturning Circulation, MOC)有趋缓的迹象,这导致热带海域上升运动强度减弱冷水上升减

\* 国家自然科学基金项目,40631006 号、40875041 号。曲维政,教授, E-mail:quweizhe@ouc.edu.cn

收稿日期:2007-06-04, 收修改稿日期:2008-04-08

少, 从而造成赤道太平洋的海面温度上升(Mcphaden, 2002)。

*PDO* 指数时间序列是多种尺度 *PDO* 变化信息载体, 作者尝试采用逐次滤波法将不同尺度的信息进行分离, 分别考察其特征和形成原因。由于海洋大气运动制约因子的复杂性, 分波难以彻底, 但试验结果表明效果仍比较明显, 能够基本分离序列的趋势变化和不同尺度周期变化(赵永平, 1994; 朱建荣等, 1995a,b; 曲维政等, 2004), 以及在一定程度上识别某些随机过程的影响, 如火山活动和海温异常等(朱建荣等, 1995a,b; 曲维政等, 2004; )。当作者滤除 *PDO* 指数时间序列中的趋势项之后, 序列显示出清楚的与太阳活动磁性变化相一致的周期性变化, 令人不得不相信北太平洋年代际振荡与太阳活动的联系。

太阳活动(solar activity)对于海洋大气系统的影响, 及其与许多地球物理事件的联系越来越清楚(曲维政等, 2004; Qu Weizheng *et al*, 2004; 曲维政等, 2003; 徐群等, 1986; Friis C *et al*, 1991; Kodera *et al*, 2002; Bond *et al*, 2001), 深入探索其联系方式的工作其实早就开始了(Agnihtri *et al*, 2002; 林元章, 2001; 侯章栓等, 2000; 洪业汤, 2000; 王家龙, 1994)。太阳磁场磁性指数(*MI*, Magnetic index)时间序列的建立(曲维政等, 2004; 曲维政等, 2007), 为具体考察太阳黑子群极性循环和磁场强度变化对于地球物理事件的影响提供了很好的参考资料, 使人们得以从太阳磁场变化去理解太阳活动及其对地球物理环境的意义, 这将有利于人们关于太阳活动对地球环境影响方式和影响途径的思考和研究。

## 1 资料序列的建立

资料取自美国国家大气研究中心和国家环境预报中心 NCAR/NCEP 再分析的全球垂直 17 个层次的月平均温度场的格点资料。时间从 1948—2000 年共 53 年, 水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。本文中作者根据各层次位势高度场和温度场格点资料建立了北太平洋阿留申低压活动区( $35^{\circ}\text{N}—60^{\circ}\text{N}$ ,  $140^{\circ}\text{W}—150^{\circ}\text{E}$ )月平均位势高度和温度时间序列及其月平均距平序列。*PDO* 指数时间序列取自文献(Hare, 1996, Mantua *et al*, 1997)。

## 2 结果

### 2.1 太阳活动与北太平洋年代际涛动

以 1 月份为代表, *PDO* 年代际变化十分清楚。

图 1 是 1 月月平均 *PDO* 指数距平连续 5 年滑动平均柱线。由图 1 可以看到, 1 月 *PDO* 指数在上个世纪 1946 年到 1978 年经历了 30 多年的低指数时期, 即所谓的冷期; 于 70 年代末发生突变进入高指数期, 即所谓的暖期, 恢复到 1946 年以前的高指数状态。这里所说趋势变化, 其实是长周期在所研究时段的反映,

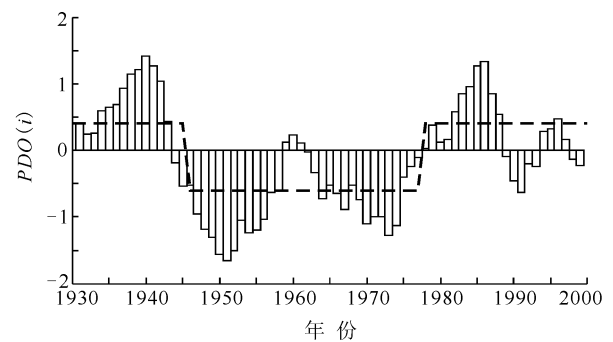


图 1 1930—2000 年 1 月 *PDO* 5 年滑动平均柱线与趋势线(虚线)

Fig.1 5-year running mean time series of *PDO* (bar) and long-term trend (dashed line) in January from 1930—2000

由于无法确定长周期波长、振幅和相角, 只能用趋势线比较粗略地表示研究时段处于长周期的升段、降段还是波峰、波谷部分的转变。图 1 中实直线  $l(i)$  表征了 *PDO* 突变前后的平均状态:

当  $i=1, 2, \dots, 16$  时:  $l_1(i) = 0.4$ , 表示 1930—1946 年的平均状态;

当  $i=17, \dots, 48$  时:  $l_2(i) = -0.6$ , 表示 1947—1978 年冷期的平均状态;

当  $i=49, \dots, 71$  时:  $l_3(i) = 0.4$ , 表示 1979—2000 年暖期的平均状态;

$$\text{则 } l(i) = l_1(i) + l_2(i) + l_3(i), \quad i = 1, 2, \dots, 71$$

从原始 *PDO* 指数时间序列  $PDO(i)$  中减去气候趋势  $l(i)$ , 即可得到不含气候趋势的 *PDO* 指数时间序列  $y(i)$ :  $y(i) = PDO(i) - l(i)$ 。

求得原始  $PDO(i)$  序列的方差:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (PDO(i) - \overline{PDO})^2 = 0.65 \quad (1)$$

式中  $\overline{PDO}$  为 1930—2000 年 1 月 *PDO* 平均值。也可以根据(1)式求得滤除趋势变化以后 *PDO* 序列的方差  $S_1=0.2678$ , 则趋势变化对于 *PDO* 指数时间序列的方差贡献率  $SS$  为:

$$OSS = ((S^2 - S_1^2) / S^2) \times 100\% = ((0.65 - 0.2678) / 0.65) \times 100\% = 58.8\% \quad (2)$$

就是说, 20 世纪以来的两个冷暖稳定状态循环的方差贡献率为 58.8%, 是冬季 1 月份北太平洋年代际涛动的第一特征。为了便于讨论, 下面先介绍关于太阳活动的两个名词。

(1) 太阳黑子活动 11 年周期 表现为黑子相对数随时间和纬度的变化: 在每个 11 年周期开始时, 少量黑子首先在太阳南北赤纬 40—30 度出现, 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。当移动到南北赤纬 20—10 度时, 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, 大约到南北赤纬 5 度时, 黑子消失, 趋近于零, 磁场恢复为约 5 高斯的太阳初始磁场。与此同时, 在南北赤纬 40—30 度又有小黑子群出现, 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。

(2) 阳黑子磁场磁性指数 如果令太阳北半球中纬度 50—30 度前导黑子为 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。作者把带有正、负号的太阳黑子相对数称为太阳黑子磁场磁性指数, 用  $IM$  (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  $IM(i)$  表示, 其中  $i$  为时间序号 (Qu Weizheng et al, 2007)。

由谱分析 (曲维政等, 2003) 可知, 如果将冷暖稳定状态看作  $PDO$  气候变化的一种趋势, 则滤除趋势变化以后 1 月  $PDO$  指数时间序列具有显著的 22 年周期性变化 (本文中所谓显著周期均超过置信水平  $\alpha=0.10$  的红噪声检验谱, 检验谱和周期参数计算方案见参考文献 (曲维政等, 2003; Qu Weizheng et al, 2004)), 22 年周期振幅  $A=0.5215$ , 初相角  $\varphi=-1.5906$  弧度, 则 22 年周期分量方程为:

$$BO_{22}(i) = 0.5215 \sin\left(\frac{2\pi}{22}i - 1.5906\right), \quad (i=1, 2, \dots, 71)$$

将 1930—2000 年 1 月滤除趋势项以后的  $PDO$  柱线与 22 年周期分量曲线绘于图 2。比较 1 月滤除趋势项以后的  $PDO$  5 年滑动平均柱线与 22 年周期分量曲线 (虚线), 可以看到二者变化趋势基本一致, 波峰波谷基本吻合, 说明 22 年周期是北太平洋年代际涛动  $PDO$  变化中所蕴涵的显著的周期性特征。根据 (1)、(2) 式的方法, 求得其方差贡献率达到 20.9%, 就是说 22 年左右周期是北太平洋年代际涛动仅次于冷暖稳定态循环的最重要的特征。

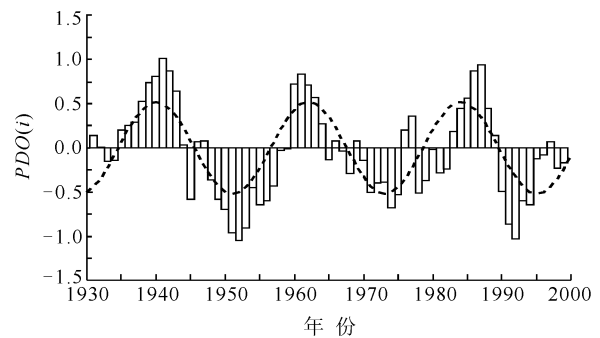


图 2 1 月滤除趋势项以后的  $PDO$  柱线与 22 年周期分量 (虚线)

Fig. 2 The  $PDO$  time series (bar) having trend term removed in January and its 22-year period component (dashed line)

为了分析北太平洋年代际涛动的这种 22 年周期性变化与太阳活动的联系, 将太阳磁场磁性指数 (Qu Weizheng et al, 2004; Qu Weizheng et al, 2007) 曲线与 1 月滤除趋势项以后的  $PDO$  5 年滑动平均柱线绘于图 3。由图 3 可以看到, 太阳磁场磁性曲线 (粗线) 与 1 月  $PDO$  距平柱线变化趋势基本一致, 波峰与波谷基本吻合, 并且超前一些, 说明北太平洋年代际涛动中所蕴涵的显著的 22 年周期是太阳活动所激发,

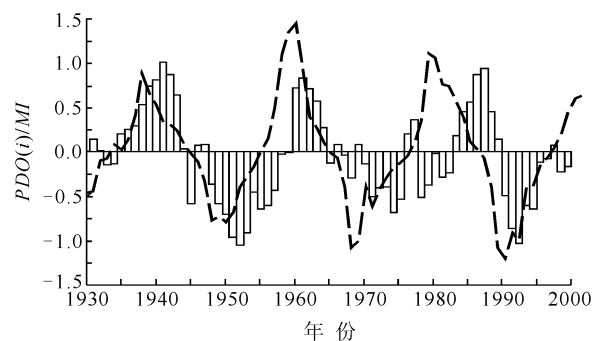


图 3 1930—2000 年 1 月  $PDO$  柱线与太阳磁性指数曲线 (虚线, 除 150)

Fig. 3 Time series of  $PDO$  (bar) in January and the solar magnetic index curve (dashed line, divided by 150)

是北太平洋年代际涛动对太阳磁场磁性变化 22 年周期的响应。图 3 中  $PDO$  变化柱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, 北太平洋年代际涛动变化还受到其它一些因素的影响, 只是其影响程度都远小于太阳活动。如上分析可知, 蕴涵于  $PDO$  中的 22 年变化周期是太阳活动所激发, 所以太阳活动对  $PDO$  异常变化的方差贡献率接近 21%, 是  $PDO$  年代际变化重要影响因子。

滤除 22 年周期以后, 谱分析显示 1 月  $PDO$  距平序列还具有显著的 11 年周期性变化, 11 年周期波振幅  $A=0.2117$ , 初相角  $\varphi=0.2684$  弧度, 则 11 年周期分量方程为:

$$BO_{11}(i) = 0.2117 \sin\left(\frac{2\pi}{11}i + 0.2684\right) \quad i=1, 2, \dots, 91$$

将此 11 年周期分量曲线与太阳黑子相对数  $R$  曲线绘于图 4。由图 4 可以看到, 两条曲线变化趋势基本相反, 波峰、波谷基本反相。两条曲线形态相对固定的取向标志着蕴涵于北太平洋年代际涛动中显著的 11 年周期是太阳活动所激发, 是  $PDO$  对太阳黑子 11 年周期的响应, 其方差贡献率超过 6.7%。

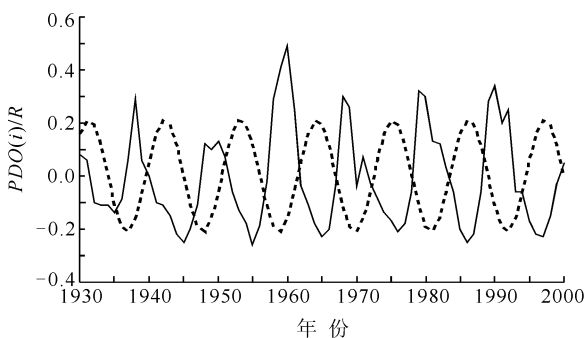


图 4 1 月  $PDO(i)$  滤除趋势和 22 年周期以后的 11 年周期分量曲线(虚线)与太阳黑子相对数  $R$  曲线(实线)

Fig.4 The  $PDO(i)$  time series having the 11-year period trend term removed and 22-year period component (dashed line) in January and the sum spot relative number  $R$  time series (solid line)

由此可以看到太阳活动是通过两条途径对北太平洋年代际涛动产生影响的: 一条与太阳黑子磁场强度变化和磁性变化相联系, 一条与太阳黑子相对数变化相联系, 前者居第一位, 后者居第二位。由计算可知 11 年周期分量方差贡献率达到 6.7%, 说明 11 年周期是  $PDO$  年代际变中所蕴涵的显著的周期成分。

由图 1 太阳磁场磁性指数曲线可知, 太阳活动在 1860—1929 年处于低水平时期, 1930—2001 年太阳

活动比较强烈, 为了比较太阳活动程度变化对  $PDO$  的影响, 本文中作者将 1930 年前后资料分别进行了分析。以上分析的是 1930—2000 年的情况, 1900 年—1929 年情况如图 5 所示。比较图 3 和图 5 可以发现, 太阳活动水平强时,  $PDO$  响应速度快并且振荡幅度大, 序列方差为 0.65, 太阳磁性指数曲线与  $PDO$  曲线变化趋势基本一致, 波峰、波谷基本吻合略有超前; 太阳活动水平弱时  $PDO$  响应速度慢并且振荡幅度小,  $PDO$  序列方差为 0.364, 太阳磁性指数曲线与  $PDO$  曲线变化趋势相反, 波峰、波谷基本呈反位相分布, 这一点由图 6 的太阳磁性指数与  $PDO$  指数落后相关函数曲线也反映得比较清楚。图 6 中实线是 1930—2000 年太阳磁性指数与  $PDO$  指数落后相关函数曲线, 由此可以看到, 太阳磁性指数与  $PDO$  指数同期呈正相关关系, 最大相关函数值落后 3—4 年, 说明  $PDO$  对太阳磁场变化的响应在落后了 3—4 年时最显著; 图 6 中虚线是 1900—1929 年太阳磁性指数与  $PDO$  指数落后相关函数曲线, 由此可以看到, 太阳磁性指数与  $PDO$  指数同期呈反相关关系, 最大正相关函数值落后 11—13 年, 说明  $PDO$  对太阳磁场变化的响应是反相的, 当太阳黑子群磁场由 S 极向 N 极转化并且逐渐加强时,  $PDO$  则处于持续减弱过程(图 5); 反之当太阳黑子群磁场由 N 极向 S 极转化并且逐渐减弱时,  $PDO$  则处于持续增强过程, 或者说太阳磁性指数波峰、波谷比  $PDO$  波峰、波谷超前了 11—13 年。由此说明北太平洋年代际涛动变化对于太阳活动的响应方式与太阳活动强弱程度有联系, 太阳活动水平强时,  $PDO$  与太阳磁场变化符号相同并且振荡幅度大, 太阳活动水平弱时,  $PDO$  与太阳磁场变化符号相反并且振荡幅度小。

夏季 7 月  $PDO$  年代际变化特征与 1 月基本相似,

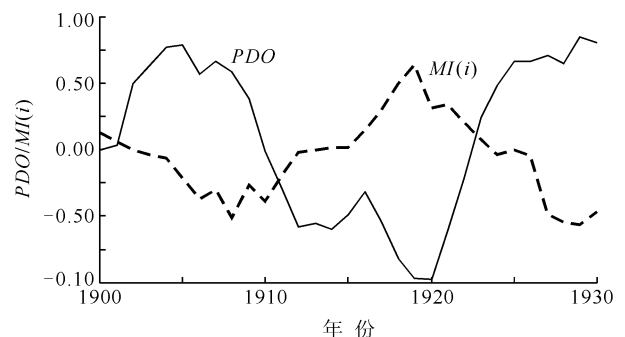


图 5 1900—1930 年  $PDO$ (实线)与  $MI(i)$ (虚线)

Fig. 5 Time series of  $PDO$ (solid line) and  $MI(i)$  (dashed line) 1900 to 1930

具有相似的暖期和冷期循环和与太阳活动相联系的周期变化,只是7月的周期变短,分别为20年周期和10年周期。

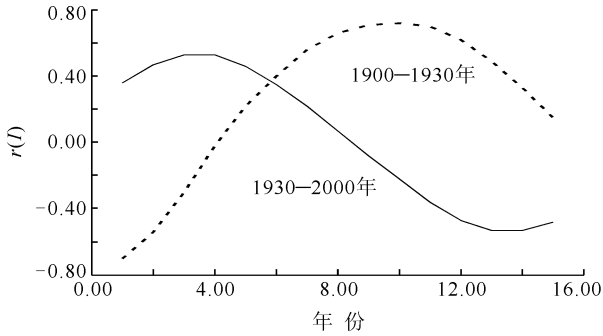


图6 MI与PDO相关函数曲线

Fig.6 Lag correlation function lines between MI and PDO

2.2 太阳活动与冬季阿留申低压强度年代际变化

1976—1988年北太平洋500 hPa位势高度显著降低、冬季阿留申低压加强,与之形成鲜明对比的是赤道中东太平洋大范围增暖和北太平洋中西部变冷,二者共同构成了引起广泛关注的20世纪70年代中后期北太平洋海洋大气系统的年代际突变(Hare, 1996, Mantua et al, 1997)。本文中作者将采用逐次滤波法进一步分析北太平洋冬季阿留申低压活动区(35°N—60°N, 140°W—150°E)海平面气压(SLP)距平场这种年代际突变的具体形式及其与太阳活动的联系。

图7是北太平洋1月月平均海平面气压SLP距平连续5年滑动平均柱线,由图7可以看到北太平洋海平面气压SLP自1948年以来经历了持续波状降压过程,海平面气压SLP 53年降低了50.0 hPa,年降压率为0.943hPa/a。图中斜线为北太平洋海平面气压年代际降压趋势线,其斜率为 $k=-50.0\text{hPa}/53\text{a}=-0.943\text{hPa/a}$ ,就是年降压率,趋势线方程为:

$$L(i)=25.0-k \times i, \quad (i=1,2,\dots,53, \text{为从1948年算起的年代序号})$$

由图7可见,气压曲线虽然呈现周期性波动,但是其沿降压趋势线不断下降的趋势十分清楚,所以20世纪40年代末开始的降压趋势成为北太平洋SLP年代际变化最显著的特征。

为了便于分析太阳活动对SLP变化的影响,作者首先把这个气候趋势从SLP序列中滤除。从原始SLP序列 $P(i)$ 中减去气候趋势 $L(i)$ ,即可得到不含气候趋势的SLP序列 $y(i)$ :

$$y(i) = P(i) - L(i)$$

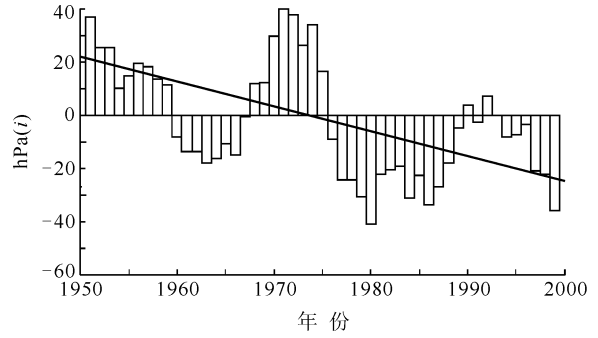


图7 北太平洋1月SLP 5年滑动平均柱线与趋势线(实线)  
Fig.7 5-year running mean SLP time series (bar) and its trend (solid line) of North Pacific in January

根据(1)、(2)式的方法,求得趋势项方差贡献率达到52.2%,就是说,降压趋势影响程度超过总的SLP异常变化的百分之五十二。

由谱分析可知,滤除趋势变化以后1月北太平洋SLP距平序列具有显著的22年周期性变化,22年周期振幅 $A=20.385\text{hPa}$ ,初相角 $\varphi=0.5395$ 弧度,则22年周期分量方程为:

$$BO_{22}(i)=20.385 \times \sin\{[(6.284 \times i)/22]+0.5395\} \\ i=1,2,\dots,53$$

将22年周期分量曲线与滤除趋势变化以后1月北太平洋SLP距平曲线绘于同一张图中,可以看到二者变化趋势基本一致,波峰、波谷基本吻合(图略),说明22年周期是1月北太平洋SLP距平年代际变化中所蕴涵的显著的周期性特征,其方差贡献率达到13.4%,是1月北太平洋SLP年代际变化中仅次于趋势项的重要特征。

为了分析1月北太平洋SLP年代际变化中的这种22年周期性变化与太阳活动的联系,将太阳磁场磁性曲线(粗线)与1月滤除趋势变化的北太平洋SLP距平值5年的滑动平均柱线绘于图8。由图8可以看到,太阳磁场磁性指数MI曲线(粗线)与1月北太平洋SLP距平值5年的滑动平均柱线变化趋势基本相反,波峰、波谷基本反相,说明北太平洋SLP年代际变化中所蕴涵的显著的22年周期是太阳活动所激发,是1月北太平洋SLP对太阳磁场磁性变化22年周期的响应。滤除22年周期以后,谱分析显示1月SLP距平序列还具有显著的11年周期性变化,11年周期波振幅 $A=6.227$ ,初相角 $\varphi=0.343$ 弧度,则11年周期分量方程为:

$$BO_{11}(i) = 6.227 \sin\left(\frac{2\pi}{11}i + 0.343\right) \quad (i=1,2,\dots,53)$$

将此 11 年周期分量曲线(虚线)与太阳黑子相对数  $R$  曲线(粗线)和滤除趋势和 22 年周期分量的北太平洋 1 月 SLP 5 年滑动平均曲线(柱线)绘于图 9, 由图 9 可以看到, 三条曲线变化趋势基本一致, 波峰、波谷基本吻合, 其中太阳黑子相对数  $R$  曲线多数情况波峰、波谷超前于北太平洋海平面气压 SLP 曲线, 标志着蕴涵于北太平洋 SLP 中显著的 11 年周期是太阳活动所激发, 是 SLP 对太阳黑子 11 年周期的响应。由此可以看到太阳活动是通过两条途径对北太平洋 SLP 产生影响的: 一条与太阳黑子磁场强度变化和磁性变化相联系, 呈反相关关系; 一条与太阳黑子相对数变化相联系, 呈正相关关系, 前者居第一位, 后者居第二位。由计算可知 11 年周期分量方差贡献率达到 1.1%, 说明 11 年周期虽然是 SLP 年代际变中所蕴涵的显著的周期成分, 但是由于影响较小而经常处于被掩盖态。

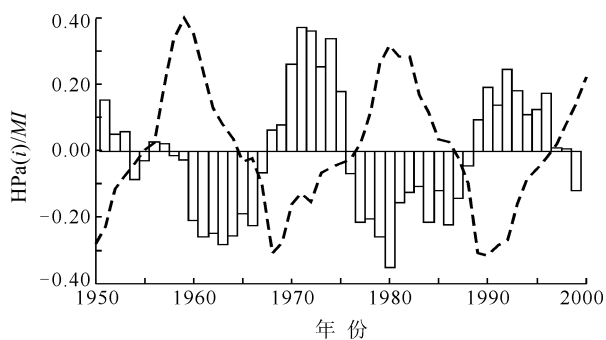


图 8 北太平洋 1 月 SLP 距平曲线(滤除趋势)与  $MI(i)$  曲线(虚线, 除 5)

Fig.8 The SLP anomaly time series (bar) having the January trend of North Pacific removed and the  $MI(i)$  curve (dashed line, divided by 5)

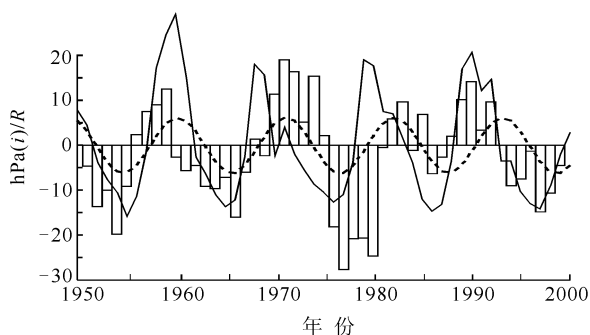


图 9 北太平洋 1 月 SLP 柱线(滤除趋势和 22 年周期分量)与太阳黑子相对数  $R$  曲线(实线, 除 5)和 11 年周期分量(虚线)

Fig.9 The SLP (bar) time series of North Pacific in January having trend and 22-year period component removed, its 11-year period component (dashed line), and the sun spot relative number  $R$  (solid line, divided by 5)

### 2.3 太阳活动与北太平洋大气温度年代际振荡

海温和大气温度场都是北太平洋海洋大气耦合系统的重要成员, 北太平洋大气温度异常变化不仅显示了大气温度场对于 PDO 或者 SST 的响应, 而且, 由于位势高度场与大气温度场迅速适应的特点, 使北太平洋大气温度场的任何改变, 都将通过位势高度场的变化从而通过风场变化参与北太平洋海洋大气系统的年代际振荡。以下以平流层底 100hPa 为例分析北太平洋大气温度场年代际变化特征, 及其与太阳活动的联系。

北太平洋 100hPa 大气温度自 1948 年以来经历了持续波状升温过程, 大气温度 53 年上升了  $2.93^{\circ}\text{C}$ , 年升温率为  $0.055^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。所以升温趋势线斜率为  $k=2.93^{\circ}\text{C}/53\text{a}=0.055^{\circ}\text{C}/\text{a}$ , 升温趋势线方程为:

$$L(i)=-1.44+k \times i, \quad (i=1,2,\dots,53, \text{为从 } 1948 \text{ 年算起的年代序号})$$

气温曲线虽然呈现周期性波动, 但是其沿升温趋势线不断上升的趋势十分清楚。

为了便于分析太阳活动对 100hPa 大气温度变化的影响, 作者首先把这个气候趋势从气温序列中滤除, 并且求得趋势项方差贡献率达到 70.03%, 由分析可知, 这是诸因素中方差贡献率最大的, 就是说 20 世纪 40 年代末开始的升温趋势成为北太平洋 100hPa 大气温度年代际变化的第一特征, 其影响程度超过总的 100 hPa 大气温度异常变化的百分之七十。

由谱分析可知, 滤除趋势变化以后, 1 月北太平洋 100hPa 大气温度距平序列具有显著的 22 年周期性变化特征, 22 年周期振幅  $A=1.05$ , 初相角  $\varphi=0.6352$  弧度, 则 22 年周期分量方程为:

$$BO22(i)=1.05 \times \sin\{[(6.284 \times i)/22]+3.14159+0.6352\} \\ i=1,2,\dots,53$$

将 22 年周期分量曲线(虚线)与滤除趋势变化以后 1 月北太平洋 100hPa 大气温度距平柱线绘于同一张图中(图 10), 可以看到二者变化趋势基本一致, 波峰、波谷基本吻合, 说明 22 年周期是 1 月北太平洋 100hPa 大气温度距平年代际变化中所蕴涵的显著周期, 其方差贡献率达到 15.13%, 乃 1 月北太平洋 100hPa 大气温度年代际变化中仅次于趋势项的重要特征。

为了分析 1 月北太平洋 100hPa 大气温度年代际变化中的这种 22 年周期性变化与太阳活动的联系, 将太阳磁场磁性指数曲线也绘于图 10(粗线)。由图 10 可以看到, 太阳磁场磁性指数  $MI(i)$  曲线与滤除趋势

变化以后 1 月北太平洋 100hPa 大气温度距平值 5 年的滑动平均柱线变化趋势基本一致, 温度曲线波峰、波谷与磁性指数曲线波峰、波谷相一一对应, 显示出太阳磁场方向变化和强度变化与大气温度的密切联系。

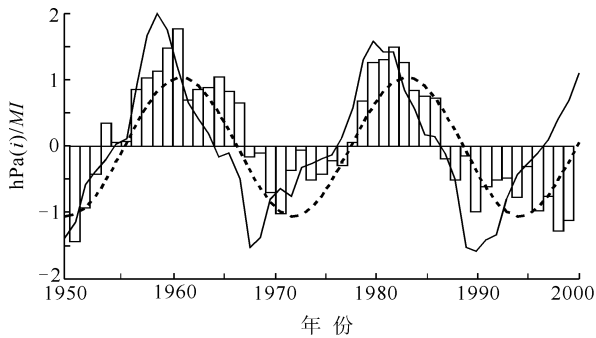


图 10 1 月 100 hPa 气温距平柱线(滤除趋势)与太阳磁场磁性指数  $MI(i)$  曲线(实线, 除 100)和 22 年周期分量曲线(虚线)  
Fig.10 Time series of January air temperature anomaly at 100 hPa (trend removed)(bar) and its 22-year period component (dashed line), and the solar magnetic index  $MI(i)$  (solid line, divided by 100)

太阳物理学和日地空间物理学研究证明, 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, 因其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。也就是说, 太阳北半球黑子群 N 极前导黑子数达到极大之前, 太阳北极区为磁 N 极, 太阳磁场南向(刘振兴, 2005; 张元东等, 2003); 反之, 黑子群 S 极前导黑子数达到极大之前, 太阳北极区为磁 S 极, 太阳磁场北向。这样, 太阳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, 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, 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, 从而使输入的动能、热能和电磁能大幅度增加, 与北太平洋平流层底 100hPa 增温时期对应, 磁暴和磁亚暴大多也发生在这一条件下(徐文耀, 2003)。太阳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, 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, 与北太平洋平流层底 100hPa 降温时期

对应。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—2 个地球半径处, 外层在 3—4 个地球半径处。这是在 1958 年人造地球卫星进入太空后的第一个重大发现, 为纪念发现者范阿仑(J.A. Van Allen)而命名为范阿仑辐射带(李喜先, 2001)。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(IMF)即太阳磁场的南向分量。就是说由图 10 还可以看到, 太阳磁场磁性指数曲线由极小值升至极大值时期, 即太阳磁场南向时期, 与北太平洋平流层底 100hPa 增温时期对应; 太阳磁场磁性指数曲线由极大值下降至极小值时期, 即太阳磁场北向时期, 与北太平洋平流层底 100hPa 降温时期对应, 显示出太阳磁场方向变化对北太平洋平流层底 100hPa 气温变化符号的重要影响。

滤除 22 年周期以后, 谱分析显示 1 月 PDO 距平序列还具有 0.1 的偏高趋势和显著的 11 年周期, 二者的合成方程为  $BO11(i)=0.186 \times \sin\{[(6.284 \times i)/11]+0.51155\}+0.1$ , 其方差贡献率达到 1.35%, 说明 11 年周期也是北太平洋 100hPa 大气温度年代际变中所蕴涵的显著的周期成分。

将北太平洋海洋大气系统年代际涛动主要成员冬季 1 月和夏季 7 月的趋势项和周期项方差贡献率列于表 1 进行比较。从下表 1 可以看到, 第一点, 北太平洋年代际涛动指数和北太平洋上空大气温度 1948 年以来都具有显著的上升趋势, 其中 PDO 是以 1978 年前后为突变点的跳跃式升温, 而大气温度则呈波状持续升温; 北太平洋海平面气压 SLP 表现为波状持续下降趋势。无论冬、夏, 北太平洋年代际涛动主要成员 1948 年以来都具有比较稳定的变化趋势, 方差贡献率都很大, 构成了其气候异常变化的第一特征; 第二点, 北太平洋海洋大气系统年代际涛动主要成员滤除趋势之后, 都表现出十分清楚的与太阳活动密切相关的约 22 年周期和约 11 年周期, 而且 22 年周期方差贡献率均大于 11 年周期, 说明太阳活动对于北太平洋海洋大气系统年代际振荡的影响是以太阳磁场变化为主, 太阳黑子相对数变化为次。22 年周期方差贡献率 1 月明显大于 7 月也说明太阳活动对

表 1 北太平洋年代际涛动主要成员趋势项和周期项冬、夏方差贡献率比较  
Tab.1 The major contributors to the Pacific Decadal Oscillation trend, and periodic terms in winter and summer

方差贡献率(%)	北太平洋年代际涛动		北太平洋 100hPa 气温		北太平洋海平面气压 SLP	
	1 月	7 月	1 月	7 月	1 月	7 月
趋势项	58.8	77.7	72.0	75.0	77.8	92.8
22 年周期	20.9	6.0	15.1	14.6	13.4	2.2
11 年周期	6.7	0.7	1.4	0.5	1.1	0.0

于地球海洋大气系统的影响方式不是以直接辐射为主, 太阳磁场磁性变化和磁场强度变化可能改变地球磁场强度和范阿仑带俘获带电粒子能力, 从而对海洋大气系统产生影响。

### 3 小结

北太平洋年代际涛动指数和北太平洋上空大气温度 1948 年以来都具有显著的上升趋势, 其中 *PDO* 是以 1978 年前后为突变点的跳跃式上升, 而大气温度则呈波状持续升温; 北太平洋海平面气压 *SLP* 表现为波状持续下降趋势。稳定的趋势变化构成了北太平洋海洋大气系统年代际振荡的第一特征。

太阳活动是北太平洋海洋大气系统周期性年代际振荡的主要启动因子, 具体反映在:

(1) 北太平洋年代际涛动 *PDO* 存在显著的准 22 年周期和准 11 年周期, 其方差贡献率分别为 20.9% 和 6.7%。分析认为, *PDO* 准 22 年周期和准 11 年周期是太阳活动所激发。研究发现, 北太平洋年代际涛动变化对于太阳活动的响应方式与太阳活动强弱程度有联系, 太阳活动水平强时, *PDO* 与太阳磁场变化符号相同并且振荡幅度大; 太阳活动水平弱时 *PDO* 与太阳磁场变化符号相反并且振荡幅度小。

(2) 滤除持续下降趋势之后, 北太平洋冬季阿留申低压活动区海平面气压(*SLP*)场表现出与太阳磁场磁性指数基本反相的周期性振荡, 滤除 22 年周期之后 11 年周期也比较清楚, 其方差贡献率分别为 13.4% 和 1.1%。

(3) 滤除持续升温趋势以后, 北太平洋 100hPa 冬季大气温度距平场表现出与太阳磁场磁性指数基本一致的周期性振荡, 滤除 22 年周期之后 11 年周期也比较清楚, 其方差贡献率分别为 15.1% 和 1.4%。研究结果说明, 太阳活动对于大气温度的影响, 黑子磁场磁性变化是决定性的, 即决定了温度变化符号, *MI* 绝对值的变化影响其量变。

### 参 考 文 献

- 王家龙, 1994. 日地系统中的太阳活动研究(I)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, 9(3): 1—11
- 曲维政, 王丽楠 刘应辰等, 2003. 北半球平流层大气温度年代际变化影响因子探索. 中国海洋大学学报, 33(5): 56—72
- 曲维政, 邓声贵, 黄 菲等, 2004. 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, 47(3): 398—404
- 曲维政, 邓声贵, 黄 菲等, 2004. 深海温度变化对太阳活动的响应. 第四纪研究, 24(3): 285—292
- 曲维政, 赵进平, 赵 雪等, 2004. 火山活动对南半球平流层气候异常变化的影响. 地学前缘, 11(2): 579—587
- 朱建荣, 秦曾灏, 1995a. 海洋对热带气旋响应的研究 1. 海洋对静止、移速不同的热带气旋响应. 海洋与湖沼, 26(2): 146—154
- 朱建荣, 秦曾灏, 1995b. 海洋对热带气旋响应的研究 11. 不同海洋热力结构下的形. 海洋与湖沼, 26(5): 255—259
- 朱益民, 杨修群, 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. 气象学报, 61(6): 641—654
- 刘振兴, 2005. 太空物理学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 326—327
- 李崇银, 咸 鹏, 2003. 北太平洋海温年代际变化与大气环流和气候的异常. 气候与环境研究, 8(3): 258—274
- 李喜先, 2001. 茫茫太空. 长沙: 湖南师范大学出版社, 23—24
- 张元东, 王家龙, 2003. 太阳风暴. 北京: 气象出版社, 47—48
- 林元章, 2001. 太阳风暴及其影响. 科技术语研究, 3(2): 38—41
- 赵永平, 1994. 冬季北太平洋西部上层海洋的热量输送. 海洋与湖沼, 25(1): 9—14
- 侯章栓, 李晓东, 2000. 近百年全球气候变化与外强迫因子信号检测. 北京大学学报, 36(5): 641—648
- 洪业汤. 2000. 太阳变化驱动气候变化研究进展. 地球科学进展, 15(4): 400—406
- 秦 剑, 田永丽, 任菊章等, 2004. 太平洋年代际涛动与云南夏季气温的年代际变化. 高原气象, 23(1): 69—77
- 徐 群, 金 龙, 1986. 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, 10(2): 204—211
- 徐文耀, 2003. 地磁学. 北京: 地震出版社, 410—411
- 程 军, 于 非, 蒲书箴等, 2004. 北太平洋热含量的年代际变化特征及其与阿留申低压的关系. 海洋科学进展, 22(4): 417—429
- Agnihtri R, Dutta K, Bhushan R *et al*, 2002. Evidence for solar



- forcing on the Indian monsoon during the last millennium. *Earth and Planetary Science Letters*, 198: 521—527
- Barnett T P, Pierce D W, Saravanan R *et al*, 1999. Origins of the midlatitude Pacific decadal variability. *Geophys Res Lett*, 26: 615—618
- Bond G B, Kromer J B *et al*, 2001. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294: 2130—2136
- Bond N A, Harrison D E, 2000. The Pacific Decadal oscillation air sea interaction and central north Pacific winter atmospheric regimes. *Geophys Res Lett*, 27(5): 731—734
- Frankignoul C, 1985. Sea surface temperature anomalies planetary waves and air-sea feedback in middle latitudes. *Rev Geophys*, 8: 233—246
- Friis Christensen E, Lassen K, 1991. Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, 254: 698—700
- Giese B S, 2002. Southern Hemisphere origins of The 1976 Climate Shift. *Geophysical Research Letters*, 29(1): 1—4
- Hare S R, Mantua N J, 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography*, 47: 103—145
- Hare S R, 1996. Low frequency climate variability and salmon production. School of Fisheries. University of Washington Seattle, 1—96
- Kodera K, 2002. Solar cycle modulation of the North Atlantic oscillation: implication in the spatial structure of the NAO. *Geophysical Research Letters*, 29(8): 1029—1038
- Latif M, Barnett T P, 1996. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: dynamics and predictability. *J Climate*, 9: 2407—2423
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y *et al*, 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Amer Meteor Soc*, 78: 1069—1079
- Masuda S, 2002. Role of the ocean in the decadal climate change in the North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 107: 17—18
- McPhaden M J, 2002. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific ocean. *Nature*, 415: 603—608
- Minobe S, 1999. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts. *Geophys Res Lett*, 26: 855—858
- Pierce D W, Barnett T P, M Latif, 2000. Connections between the tropic and midlatitude on decadal time scales. *J Climate*, 13: 1173—1194
- Qu Weizheng, Deng Shenggui, Huang Fei *et al*, 2004. The influence of magnetic index abnormal change in solar magnetic field on climate at middle latitude of North Hemisphere. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(3): 448—456
- Schneider N, 2002. Pierce of North Pacific decadal variability. *Journal of Climate*, 15: 586—605
- Shoshiro M, 2000. Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the north pacific. *Progress in Oceanography*, 47(2—4): 381—408
- Weare B C, Navato A, Newell R E, 1976. Empirical orthogonal Analysis of Pacific Sea Surface Temperatures. *J Phys Oceanogr*, 6: 671—678

## SOLAR ACTIVITY AND THE NORTH PACIFIC DECADAL OSCILLATION

QU Wei-Zheng, HUANG Fei, ZHAO Jin-Ping, JIA Ying-Lai, LI Chun, YUE Shu-Hong  
(*Ocean Environment College of China Ocean University, Qingdao, 266100*)

**Abstract** The decadal oscillation in the ocean-atmosphere system in North Pacific and main factors were studied with stepwise filtration. Results show that it is the solar activity that triggers the oscillation, which gain supports from: 1) the Pacific Decadal Oscillation (*PDO*) had 22-year and 11-year periods, which matches those of the solar activity. The two periods are the second important components after the trend term, which contributed 20.9% and 6.7% respectively to the oscillation. The *PDO* variation is related to the scale of the solar activity: the stronger the solar activity, the larger the oscillation amplitude that in-phase with solar magnetic field variation, or vice versa, weak and out-of-phase. 2) After removing the descending trend, the sea level pressure (*SLP*) in wintertime over the Aleutian Low area shows a periodic oscillation in anti-phase against that of the magnetic index (*MI*) of solar magnetic field. The 11-year period is obvious after the 22-year-period filtrated. The two periods accounted for 13.4% and 1.1% contribution to the variance, respectively. 3) After removing the ascending trend, the atmospheric temperature at 100 hPa in North Pacific is largely in phase of that of *MI* that shows a clear 11-year period once the 22-year period is cleared, and contributed 15.1% and 1.4%, respectively. Therefore, the solar activity affect the atmospheric temperature via magnetism change. The variation in absolute *MI* value determines the temperature.

**Key words** Solar activity, Magnetic index of solar magnetic field, Pacific Decadal Oscillation