

曲维政, 李艳芳, 李春等. 2014. 北极涛动低空大气环流特征及其与太阳活动的联系. 地球物理学报, 57(5):1377-1386, doi: 10.6038/cjg20140503.

Qu W Z, Li Y F, Li C, et al. 2014. Low altitude atmospheric circulation characteristics of Arctic oscillation and its relation to solar activity. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(5):1377-1386, doi:10.6038/cjg20140503.

北极涛动低空大气环流特征及其与太阳活动的联系

曲维政, 李艳芳, 李春, 杜凌, 黄菲

中国海洋大学, 青岛 266100

摘要 通过北极涛动 AO 正负位相时期北半球 1000 hPa 月平均位势高度、位势高度距平和气温月距平图对比分析可知, 北极区域异常增暖时期对应着 AO 负位相时期, 而北极区域异常偏冷时期对应着 AO 正位相时期, 说明北极区域气温异常变化是决定 AO 异常变化的重要因子. 逐次滤波法分析可知, 冬季 1 月北极涛动现象表现出十分清楚的与太阳活动密切联系的准 110a 世纪周期和准 22a 年代际周期, 具体表现为: (1) 冬季 1 月北极涛动现象具有十分清楚的与太阳活动密切联系的准 110a 世纪周期. 准 110a 世纪周期对于北极涛动指数的方差贡献率达到 44.4%, 是冬季 1 月北极涛动现象最显著的世纪际变化特征. (2) 谱分析结果表明, 滤除准 110a 世纪周期变化以后的 1 月北极涛动指数具有显著的 22a 周期, 其方差贡献率达到 18.5%, 乃仅次于准 110a 世纪周期之后北极涛动指数年代际变化重要特征. 对比分析表明, 太阳活动尤其是太阳磁场磁性指数变化与 1 月北极涛动 22a 周期变化呈密切的反相关关系, 二者变化趋势基本相反, 即多数情况当太阳磁性指数 MI 由最低值转为上升以后都可引起北极涛动 AO 由最高值转为下降; 当太阳磁性指数 MI 由最高值转为下降以后都可引起北极涛动 AO 由最低值转为上升. 综上所述, 北极涛动的准 110a 世纪周期变化、22a 年代际周期变化对于北极涛动方差贡献率达到 62.9%, 标志着太阳活动是北极涛动的重要驱动因子.

关键词 北极涛动; 极地涡旋; 北极气温; 太阳活动; 太阳磁场; 太阳黑子相对数

doi:10.6038/cjg20140503

中图分类号 P353

收稿日期 2013-05-16, 2014-02-25 收修定稿

Low altitude atmospheric circulation characteristics of Arctic oscillation and its relation to solar activity

QU Wei-Zheng, LI Yan-Fang, LI Chun, DU Ling, HUANG Fei

Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract Based on the comparative analysis of the monthly average geopotential height, geopotential height anomaly and temperature anomaly of the Northern Hemisphere at the place with an air pressure of 1000 hPa during the positive and negative phases of Arctic Oscillation (AO), it may be seen that the abnormal warming period in the Arctic region corresponds to the negative phase of AO, while the anomalous cold period corresponds to its positive phase. This shows that the abnormal change in the Arctic region is an important factor deciding the anomalies of AO. It may be seen that the AO phenomenon occurring in January shows a clear quasi-110-year century cycle and quasi-22-year decadal cycle, which are closely related to solar activities. The specific observations are as follows: (1) The AO phenomenon occurring in January has a clear quasi-88-year century cycle closely related to solar activities. The variance contribution rate of the quasi-110-year century cycle for AO indexes reaches 44.4%, which is the most significant century

基金项目 国家自然科学基金(41330960, 41376008)资助.

作者简介 曲维政, 男, 1945 年 10 月出生, 中国海洋大学教授, 主要从事气候异常变化研究. E-mail: quweizhe@ouc.edu.cn

change characteristic of the AO phenomenon occurring in January. (2) The spectral analysis results show that the AO indexes in January after filtering out the changes of 110-year century cycle have a significant 22-year cycle, and their variance contribution rate reaches 18.5%, which is second only to the important characteristics of the interdecadal changes of AO indexes after quasi-110-year century cycle. The comparative analysis results show that there is a close inverse relationship between the solar activities (especially the solar magnetic field index changes) and the changes in the 22-year cycle of the AO occurring in January, and that the two trends are basically opposite to each other. That is to say, in most cases after the solar magnetic index MI rises from the lowest value, the solar magnetic field turns from north to south, and the high-energy particle flow entering the Earth's magnetosphere increases to heat the polar atmosphere, thus causing the AO to drop from the highest value; after the solar magnetic index MI drops from the highest value, the solar magnetic field turns from south to north, and the solar high-energy particle flow passes through the top of the Earth's magnetosphere rather than entering it to heat the polar atmosphere, and thus the polar temperature drops, causing the AO to rise from the lowest value. In summary, the variance contribution rate of the changes in the quasi-88-year century cycle and quasi-22-year decadal cycle for the AO reaches 62.9%, indicating that solar activity is an important driving factor of the AO.

Keywords Arctic Oscillation; The polar vortex; Arctic temperatures; Solar activity; Solar magnetic field; Relative number of sunspots

1 引言

关于太阳活动对于地球气候和大气环流的影响,许多人已经注意到(Lean et al., 1995; Friis-Christensen and Lassen et al., 1991; Friis-Christensen, 1993; Qu et al., 2004; Qu et al., 2012),这不仅取决于太阳辐射量的变化,还通过太阳磁场大幅度变化对地球磁场强弱和形态施加影响,改变地球磁场俘获带电粒子的能力,使进入地球磁场的带电粒子在洛仑兹力作用下绕地球磁场磁力线巡回于南北极之间,释放能量,加热大气.虽然太阳活动期间辐射量增加不是很大,可是地球磁场俘获所有波段太阳辐射的能力却成倍增强.所以地球温度增加幅度远大于太阳辐射量的增加幅度.就是说太阳活动是通过太阳辐射变化和太阳磁场变化两个方面共同对地球气候和地球物理环境施加影响,而且后者作用更大.

太阳磁场磁性指数(MI, Magnetic index)时间序列的建立(Qu et al., 2004; Qu et al., 2012; Qu et al., 2007),为具体考察太阳黑子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一份很好的参考资料,使我们得以从太阳磁场变化角度研究和理解太阳活动及其对地球环境和地球物理事件的

影响方式和影响途径.本文就是从太阳辐射变化和太阳磁场变化两个方面考察太阳活动对北极涛动的影响.太阳磁场变化及其对于许多地球物理事件的影响越来越清楚,深入探索其联系方式的工作其实早就开始了(Qu et al., 2006; Zhang and Xiao, 2000; Zhang et al., 1998; Shi and Wang, 1994; Dong, 1997; Liu et al., 2001; Qu et al., 2003).

北极涛动(AO, Arctic Oscillation)是指北极极地附近区域气压和环绕极地的中纬度气压场反位相振荡现象,乃大气运动的主要型式,并且北半球大气运动各主要变量都具有AO的振荡模态,与北极涛动AO异常变化相联系的大气气候异常早已超出了极地区域而涉及整个半球,在气温、降水、海冰、大气活动中心、季风和极端气候事件等许多方面均有清楚的联系迹象(Gong et al., 2002; Thompson et al., 2000; Rigor et al., 2000; Thompson and Wallace, 1998).这种振荡由低空到高空呈现等效正压特性,而且随高度增加,南北向振荡形式更为清楚,方差贡献率更大,成为大气运动的主导形式. AO存在着非常宽的频域,从年际到年代际尺度上都非常明显.所以北极涛动AO变化规律研究,特别是年代际变化特征研究成为气候异常变化研究重要组成部分,意义十分清楚.

驱动北极涛动现象的强迫源何在?一些研究已

经注意到诸如海冰消长、海温场异常等因素影响, 作者认为这些只是直接关联的现象, 无论海冰海温异常都是气温异常变化的结果, 所以气温的异常变化特别是极地气温变化才是 AO 的启动因素, 而极地气温异常变化最重要的因子就是太阳活动, 从而将北极涛动—极地气温—太阳活动联系在一起了。

本文采用逐次滤波法研究表明, 北极涛动 AO 具有稳定的与太阳活动相一致的显著的周期性, 使我们对于北极涛动现象驱动因子有了进一步的认识。

资料取自 http://www.atmos.colostate.edu/ao/Data/ao_index.html [2013-03-20]。

2 北极涛动所反映的低空大气环流特征

北极涛动又称为北半球环状模 (NAM, Northern Hemisphere annular mode), 是以相关符号反映的极地区域与北半球中纬度大气反相振荡特征的, 没有给出具体的大气环流特点。为了深入了解 AO 反映的大气环流特征, 探索其启动因素, 把研究置于物理意义清楚的大气温压场结构层面, 本文选择这种振荡形式最清楚的 NAM 时间系数最大值月份, 这个时候北半球大尺度大气环流分布特征基本刻画了 AO 正位相时期北极涛动在大气环流上的反映, 也是我们从大气环流方面研究北极涛动形成机制的切入点。

2.1 北极涛动正负位相时期北半球中高纬度 SLP 大气环流特征的差异

从 1889—2013 年 1 月 AO 时间序列可知, AO 正位相最大值出现在 1993 年 1 月 (月距平值: 4.162), 就是说, 无论与 AO 各历史时期比较, 还是与其他各振荡模态比较, 此时环状模特点最突出, 考察这个时候北半球大气环流的特征, 是从大气环流角度研究北极涛动产生原因的最佳时刻。

我们求得 1993 年 1 月北半球 (20°N 以北) 1000 hPa 位势高度月平均值, 绘于图 1a。从图 1a 可以看到, 北极附近是发展深厚的极地涡旋, 环绕极地的中纬度 (20°N — 50°N) 是高压带, 两个高压中心分别位于亚洲大陆北部和非洲大陆北部。由此看来, 冬季 1 月北极涛动发展水平主要决定于极地涡旋和环绕极地的中纬度高压带, 当极地涡旋和中纬度高压带异常发展时, 北极涛动强烈, 极涡活动区气压下降, 中纬度气压升高, 中高纬度与极地气压梯度增加, 西风增强。

1889—2013 年 AO 负位相最大值是 1940 年 1 月, 月距平值为 -3.451 , 次大值是 1977 年 1 月, 月

距平值为 -3.279 。考虑到 1940 年代气象资料密度代表性不如 1970 年代, 而且 1948 年至 2013 年 1 月 AO 负位相最大值就是 1977 年 1 月的 -3.279 , 于是选择了 1977 年 1 月为代表月份进行分析。

求得 1977 年 1 月北半球 1000 hPa 位势高度月平均值绘于图 1b, 从图 1b 可以看到, 极地涡旋填塞分裂之后移出极区, 取而代之的是一个极地闭合高压中心。在通常的北美大湖槽区和阿留申低压区域形成了两个深厚冷性低涡, 环绕极地的中纬度高压带崩溃, 北半球经向环流取代纬向环流, 气候寒冷。

2.2 北极涛动正负位相时期北半球中高纬度 700 hPa 大气环流特征的差异

由于 AO 所具有的相当正压的垂直结构, 从地面至平流层随高度增加, AO 的南北向振荡形式更为清楚。所以, 为了与地面图进行比较, 我们选择对流层中下部 700 hPa 层进行分析。

我们求得 AO 正位相最大值的 1993 年 1 月北半球 (20°N 以北) 700 hPa 位势高度月平均值, 绘于图 1c。从图 1c 可以看到, 北极附近是发展深厚的极地涡旋, 环绕极地的中纬度 (20°N — 60°N) 是比较平缓的槽脊波动, 三个浅高压脊分别位于亚洲大陆北部、北美大陆西北部和非洲—欧洲大西洋沿岸。当北极涛动处于正位相时, 中纬度指向极地的气压梯度很大, 中高纬度盛行纬向环流, 限制了极区冷空气向南扩展, 寒潮出现频率较少, 北半球较少严寒天气。

求得 AO 负位相最大值的 1977 年 1 月北半球 700 hPa 位势高度月平均值绘于图 1d, 从图 1d 可以看到, 极地涡旋填塞分裂之后移出极区, 取而代之的是一个极地闭合高压中心。在通常的北美大湖槽区和东亚大槽—阿留申低压区域形成了两个深厚冷性低涡。受这两个低涡影响, 1977 年 1 月北美大陆和欧亚大陆中高纬度气温异常偏低, 气候寒冷。

只有欧洲大西洋沿岸和北美太平洋沿岸受脊前暖湿气流影响, 气候温润多雨。

AO 揭示了北半球极地与中纬度气压场涨落规律, 下面看一下 AO 正位相与 AO 负位相时期北半球极地与中纬度 1000 hPa 距平场分布特点。

从图 2a 可以看到, 在 AO 正位相的 1993 年 1 月极地区域气压异常偏低, 负距平达到 -28 hPa 以下, 环绕极地的北纬 40° 附近是正距平带, 非洲—欧洲大陆的正距平中心达到 $+12$ hPa 以上。由此看来, 冬季 1 月北极涛动发展水平主要决定于极地涡旋和中纬度高压脊; 当极地涡旋和中纬度高压带异常发展时, 北极涛动强烈, 极涡活动区气压下降, 中纬度

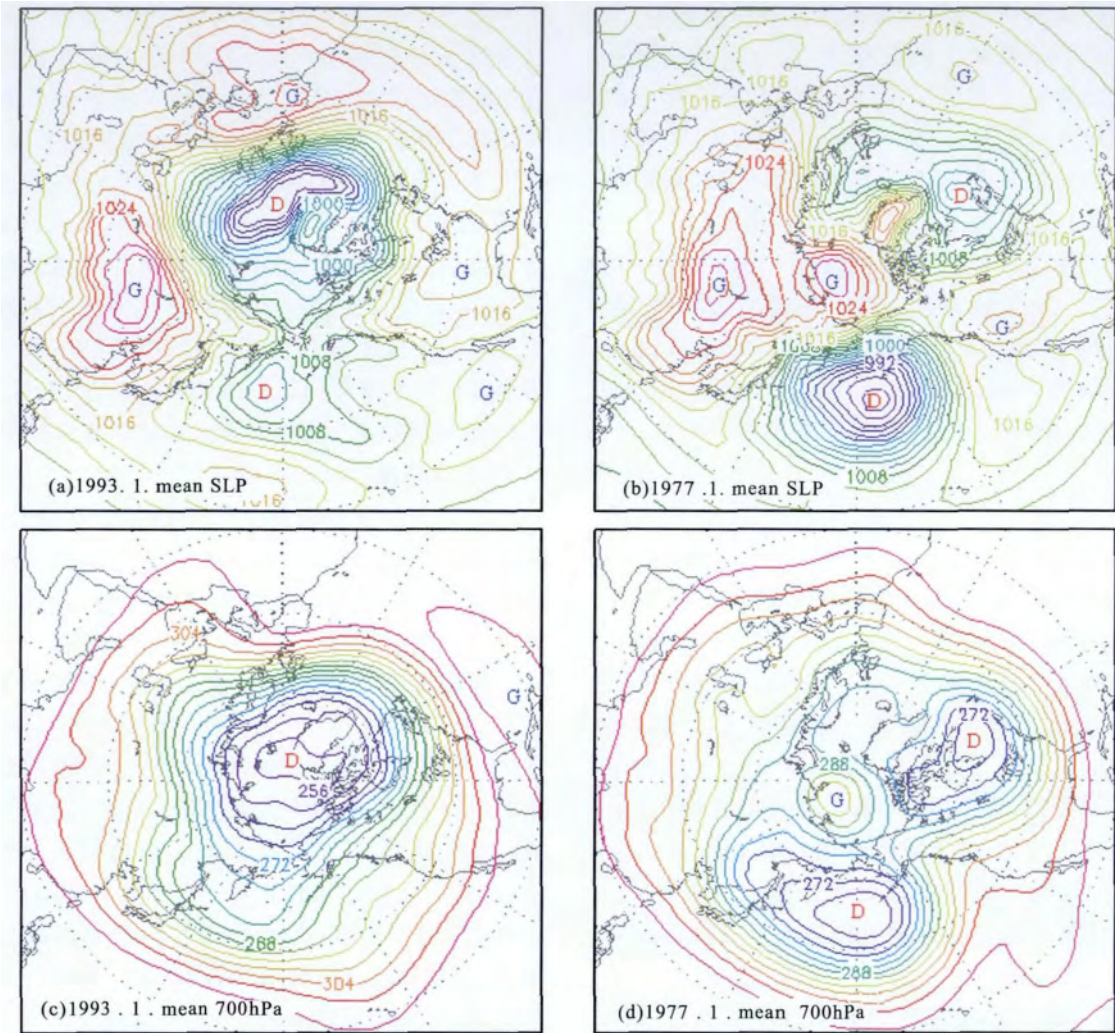


图 1 1993 年和 1977 年 1 月北半球 1000 hPa 和 700 hPa 位势高度分布图

Fig. 1 Geopotential height distribution diagram of Northern Hemisphere SLP and 700 hPa in January 1993 and January 1977

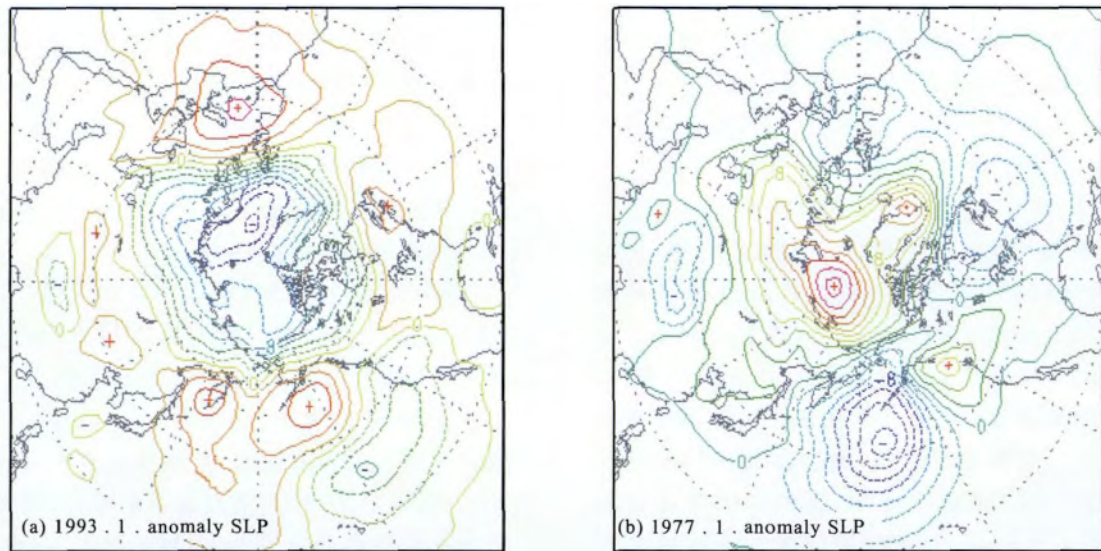


图 2 1993 年和 1977 年 1 月北半球 1000 hPa 位势高度距平分布图

Fig. 2 Geopotential height distribution diagram of Northern Hemisphere in 1000 hPa in January 1993 and January 1977

高压区域气压升高, 中-高纬度气压梯度增加, 西风增强, 纬向环流盛行。

从图 2b 可以看到, 在 AO 负位相的 1977 年 1 月北极区域 1000 hPa 气压异常升高, 正距平达到 +28 hPa 以上, 环绕极地的北纬 40° 附近是负距平带, 北太平洋的负距平中心达到 -20 hPa 以下。由此看来, 冬季 1 月当极地涡旋和中纬度高压带异常减弱时, 北极涛动也减弱, 极涡活动区气压升高, 高压带区域气压下降, 中-高纬度气压梯度减小, 西风减弱, 纬向环流崩溃, 经向环流盛行, 南北冷暖空气交流活跃。

2.3 北极涛动正负位相时期北半球中高纬度 SLP 气温异常分布特征的差异

图 3 是北极涛动正、负位相时期北半球中高纬度 1000 hPa 气温异常分布特征。其中图 3a 是 AO 正位相的 1993 年 1 月北半球 20° 以北的 1000 hPa 气温异常分布图, 此时, 北极区域气温异常偏低, 导致等压面下降, 极地涡旋异常加深; 极区以外的中高纬度以气温正距平为主, 导致位势高度场也是以正距平为主, 正距平与位于亚洲大陆北部、北美大陆西北部和非洲—欧洲大西洋沿岸三个高压中心位置大致对应, 见图 1a)。

图 3 b 是 AO 负位相的 1977 年 1 月北半球 20° 以北的 1000 hPa 层气温异常分布图, 北极区域气温异常偏高, 中纬度则气温异常偏低。北极区域气温异常偏高, 导致极地涡旋填塞分裂之后移出极区, 取而代之的是一个极地闭合高压中心; 中纬度气温异常偏低引起了位势高度异常下降, 是北美大湖槽区和东亚大槽—阿留申低压区域两个深厚冷性低涡形成的主要原因。与图 2b 比较, 可以看到 1977 年 1 月

1000 hPa 气温距平符号分布与位势高度距平符号分布大致一一对应, 可见大气温度场变化导致位势高度场的快速适应。

AO 正负位相比较, 温压场有三点重要差异:

(1) AO 正负位相时期最显著的差异是北极区域由气温负距平区变为正距平区。极地涡旋乃冷性深厚低压环流系统, 气温升高引起了低涡系统减弱填塞(如图 1 所示), 北极区域位势高度也由负距平变为正距平(如图 2 所示)。

(2) 其次, AO 正负位相时期沿北纬 40° 纬圈附近由气温正距平带变为负距平带, 相应地位势高度场也由正距平变为负距平带。

(3) 1993 年 1 月 AO 正位相时期, 由中高纬度指向北极区域的气压梯度异常增大, 导致西风环流异常增强, 环绕极地的纬向环流盛行, 有效地将冷空气阻隔于北极区域; 1977 年 1 月 AO 负位相时期, 中高纬度环绕极地的纬向环流崩溃, 极涡填塞分裂, 分离为北美大湖区冷涡和东亚冷涡, 导致北美、亚洲和北半球中纬度大部分地区寒潮频发, 气候寒冷。

2.4 极地气温异常变化的成因和意义

AO 正负位相时期北极区域由气温负距平区变为正距平区, 那么, 极区气温符号相反的异常变化意义何在? 是什么因素引起了极区气温发生了符号相反的变化? 以及气温变化与气压场变化的关系是什么?

(1) 当等压面 P_1 、 P_2 之间气柱的平均温度为 T_{bm} , 气体常数为 R , 根据静力学积分方程, 两等压面之间的位势厚度 $\Phi_2 - \Phi_1$ 为

$$\Phi_2 - \Phi_1 = -R \int_{P_1}^{P_2} T d \ln P = RT_{bm} \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (1)$$

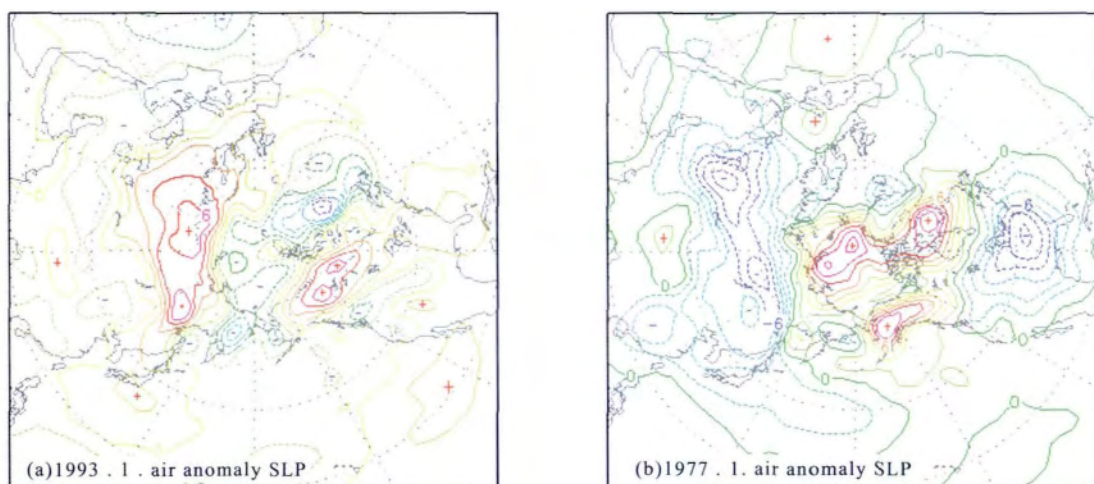


图 3 北半球 1000 hPa 气温距平分布图:(a) 1993 年 1 月, (b) 1977 年 1 月

Fig. 3 Distribution diagram of temperature anomaly in the Northern Hemisphere SLP in January 1993 (a) and January 1977 (b)

由此可知,两等压面之间位势厚度 $\Phi_2 - \Phi_1$ 的变化是由气柱的平均温度 T_{bm} 决定的,所以极区大气温度的异常变化将引起极地涡旋强度变化,当极地气温异常升高时,700 hPa 位势高度增加,极地涡旋减弱甚至填塞变为高压,如 AO 负位相的 1977 年 1 月,北极区域气温异常偏高,北极低涡消失,取而代之的是高压中心;当极地气温异常偏低时,700 hPa 位势高度减小,极地涡旋加深,如 AO 正位相的 1993 年 1 月,由于极地气温下降极涡加深,导致中高纬度指向北极区域的气压梯度异常增大,西风环流异常增强,环绕极地的纬向环流盛行。

(2) 气压场变化之后,由高压脊所主导的温度平流分布也发生相应变化,从而影响了温度分布格局。如 AO 正位相的 1993 年 1 月欧洲南部大西洋沿岸和北美西部太平洋沿岸只是一个浅脊,脊后暖平流引起的增温主要在欧洲南部和北美南部;AO 负位相的 1977 年 1 月原来在欧洲南部大西洋沿岸和北美西部太平洋沿岸的浅脊得到加强北进(见图 1d),脊后暖平流引起的增温不仅影响到欧洲南部和北美西部,进而影响到北极区域(见图 3),成为北极区域异常增暖的重要因素;脊前冷平流引导极地冷空气南下,使东亚大槽加深为深厚的东亚冷涡,使北美大湖区低槽加深为深厚的大湖区冷涡,两大深厚冷涡的存在,导致北半球中纬度异常寒冷。

上述两点说明,气压场虽然总是由大气温度的变化决定的,但是气压场形势变化以后便立即对温度场分布产生反作用,所以大气系统内部温压场总是在相互快速适应而趋于平衡状态。只有外部额外的热量输入才可能打破这种平衡,产生气候异常。

(3) 大气系统的热量来源主要是太阳辐射和地球反射的太阳辐射以及地球本身的长波辐射,而后面两种辐射也是主要源于太阳辐射,所以地球大气系统的热量来源主要是太阳辐射。

关于太阳辐射,随着研究的不断深入,人们逐渐认识到影响地球气候的太阳辐射包括两个方面:一是可见光和短波辐射;二是太阳高能粒子流喷发。

太阳可见光和短波辐射是地球气候形成的决定性因素,但是其异常变化较小,只占太阳总辐射的 1% 左右,不足以激发地球气候发生大幅度振荡。研究证明,太阳爆发时期其高能粒子流是平静时期的数百万倍,是激发地球气候异常振荡重要因子。

太阳爆发时期也是太阳磁场异常增强时期,并且太阳高能粒子流是沿太阳磁场磁力线向外运动的,所以太阳磁场强度和磁场方向变化是太阳活动

影响地球气候十分关键的因素,更由于太阳磁场方向变化能够对地球磁层形态施加影响,即当太阳磁场南向,行星际磁场磁力线与地磁场磁力线相连接,地球磁层成为开磁层,太阳风携带大量等离子体沿磁力线涌入地球磁层,进入地球磁场的带电粒子在洛伦兹力作用下绕磁力线巡迴于南北极之间,释放能量,加热大气;反之当太阳磁场北向,地球磁层闭合,太阳风携带的大量等离子体从地球磁层外围滑过,难以进入地球磁层。所以太阳磁场南向时期与北向时期,对应着地球磁层获得太阳辐射能量异常偏多时期和异常偏小时期。显然,这种情况对于地球气候来说至关重要!特别是两极区域,高能粒子流不仅影响极地高空大气,而且直接与低层大气接触,加热极地低空大气。所以北极区域对于太阳爆发尤其敏感。

本文就是从太阳磁场强度和磁场方向变化两个方面考察太阳活动对北极涛动的影响。

3 北极涛动异常变化的周期性及其与太阳活动的联系

太阳活动、太阳磁场强度和磁场方向变化存在显著的 80~110a 世纪周期和准 22a 周期 (Qu et al., 2007)。既然北极区域大气温度的变化对于太阳爆发尤其敏感,那么,北极涛动就应该与太阳活动具有尺度类似的周期变化,实际情况是否如此呢?回答是肯定的!本节主要阐明北极涛动的周期性及其与太阳活动的密切联系。

3.1 北极涛动的周期特征

对 1889—2013 年北极涛动指数时间序列完成了功率谱分析,并作信度 $\alpha=0.05$ 显著性检验,计算方案见参考文献 Qu 等 (2003)。由表 1 可以看到(表中黑体字栏),北极涛动指数第二行功率谱密度在 1 波处(对应周期 110a)和 4 波处(对应周期 22a)显著大于第三行红噪音检验谱值,通过了信度 $\alpha=0.05$ 显著性检验,就是说 1 波对应的 110a 周期和 4 波对应的 22a 周期是北极涛动的显著周期。

根据表第 5 行第 6 行可知,110a 周期波的振幅 $A=0.592$,初相角 $\varphi=0.51$ rad,则 110a 周期分量 $C_{110}(i)$ 方程为

$$\begin{aligned} C_{110}(i) &= \sum_{l=1}^m A_l \sin\left(\frac{2\pi}{T_l} i + \varphi_l\right) \\ &= 0.592 \times \sin\left(\frac{2\pi}{110} i + 0.51\right), \\ &\quad (i = 1, 2, \dots, 115), \end{aligned} \quad (2)$$

表 1 1889—2013 年北极涛动指数功率谱与检验谱(信度 $\alpha=0.05$)Table 1 Power spectrum and test spectrum of the AO index from 1889 to 2013 (reliability $\alpha=0.05$) wavelength

波数	0	1	2	3	4	5	6	7	8
谱密度	0.009	0.459	0.082	0.038	0.233	0.053	0.027	0.020	0.002
检验谱	0.686	0.379	0.162	0.083	0.049	0.033	0.023	0.017	0.013
波长	∞	110	44	29	22	17	14	12	11
振幅	2.000	0.592	0.268	0.216	0.357	0.153	0.162	0.054	0.042
初相角	0.000	0.510	0.867	-0.27	-1.53	-1.27	0.338	0.051	1.210

其中 l 为波数, 即第几波; m 为最大后延, 即分波总数.

由表 1 可以看到, 北极涛动指数功率估计谱在 4 波处显著通过了信度 $\alpha=0.05$ 显著性检验, 就是说 4 波对应的准 22a 周期, 是北极涛动显著周期. 根据表第 5 行第 6 行可知, 22a 周期波的振幅 $A=0.357$, 初相角 $\varphi=-1.53$ rad, 则 22a 周期分量 $C_{22}(i)$ 方程为

$$\begin{aligned} C_{22}(i) &= \sum_{l=1}^m A_l \sin\left(\frac{2\pi}{T_l} i + \varphi_l\right) \\ &= 0.357 \times \sin\left(\frac{2\pi}{22} i - 1.53\right), \\ &(i = 1, 2, \dots, 101). \end{aligned} \quad (3)$$

尽管谱分析揭示了 110a 周期和 22a 周期是北极涛动的显著周期, 那么实际情况如何呢? 下面将理论周期曲线与 AO 时间序列实况曲线绘在同一张图上比较, 做一个检验.

将 1 月北极涛动 AO 指数距平值 9a 的滑动平均曲线(实线)和 110a 周期分量曲线绘于图 4(粗实

线, 根据(2)式计算), 二者比较可以看到 110a 周期与 AO 实况曲线变化趋势基本一致, 说明 110a 周期是北极涛动指数世纪变化中所蕴涵的显著的周期性特征, 在 1900—2013 年时段 110a 周期可以看做北极涛动的变化趋势.

要把 22a 周期也绘在图 4 上, 需要将 110a 周期和 22a 周期合成, 即

$$\begin{aligned} C_{110,22}(i) &= (2) \text{ 式} + (3) \text{ 式} \\ &= 0.592 \times \sin\left(\frac{2\pi}{110} i + 0.51\right) \\ &\quad + 0.357 \times \sin\left(\frac{2\pi}{22} i - 1.53\right), \\ &(i = 1, 2, \dots, 115). \end{aligned} \quad (4)$$

根据方程(4)把 22a 周期也绘在图 4 上(粗虚线), 可以看到 22a 理论周期与 AO 波动十分吻合, 说明 22a 理论周期正确反映了 AO 的实际波动特征.

3.2 北极涛动的世纪周期与太阳活动世纪周期的联系
为了便于分析太阳活动世纪周期与北极涛动世

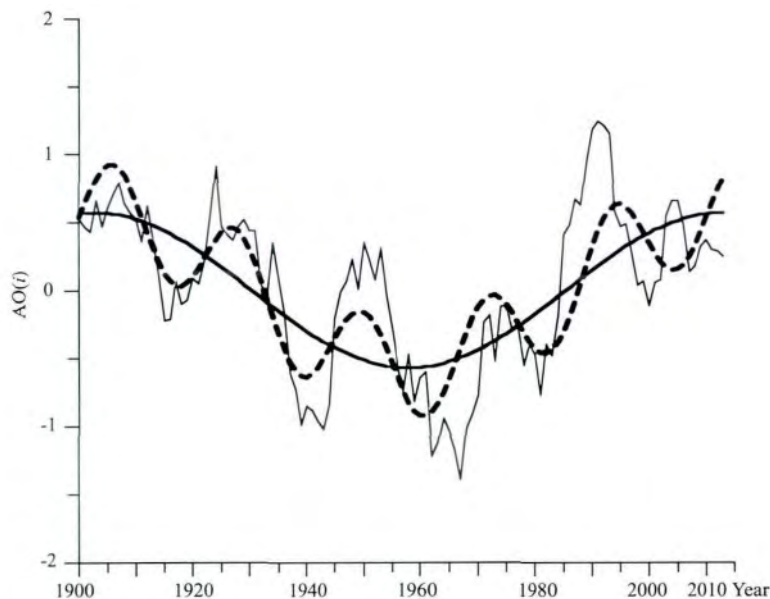


图 4 1 月 AO 指数 9a 滑动平均曲线与 AO 110a 准周期分量曲线(粗实线)和 AO 准 22a 周期曲线(粗虚线)

Fig. 4 AO index in January 9 years moving average curve and AO 110-year quasi-periodic component curve (heavy line), and AO 22-year cycle curve (dashed line)

纪周期的联系,我们把太阳活动沃尔夫指数(R. Wolf)准 110a 周期(Qu et al., 2014)曲线(粗虚线)叠加在图 5 上,由图 5 看到太阳活动准 110a 世纪周期与北极涛动 110a 世纪周期波峰波谷基本反相,太阳活动准 110a 周期变化超前,可以认为是太阳活动激发了北极涛动的世纪际周期性变化.

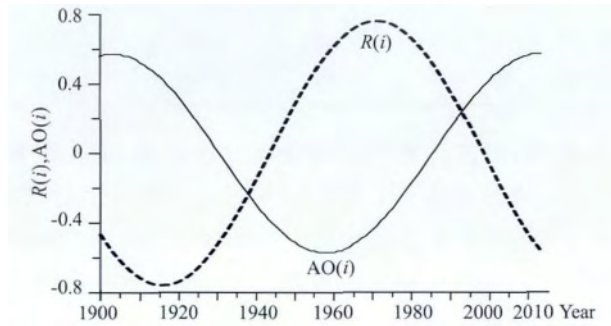


图 5 1 月 AO 110a 周期(实线)与太阳活动 110a 周期曲线(粗虚线)

Fig. 5 AO 110-year quasi-periodic component curve (solid line), and solar activity 110-year cycle curve (dashed line)

为了便于分析太阳活动对北极涛动年代际周期性变化的影响,我们首先把这个世纪周期从北极涛动指数序列中滤除.从原始北极涛动指数序列 $AO(i)$ 中减去 110a 周期,即可得到不含世纪周期的北极涛动指数序列 $y(i)$:

$$y(i) = AO(i) - C_{110}(i),$$

求得原始北极涛动指数序列 $AO(i)$ 的方差:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (AO(i) - \overline{AO})^2 = 0.3481, \quad (5)$$

式中 \overline{AO} 为 1889—2013 年 1 月北极涛动指数平均值.滤除世纪周期变化以后北极涛动指数序列的方差 $S_1^2 = 0.441$,则世纪周期变化对于北极涛动指数的方差贡献 SS 为

$$SS = ((S^2 - S_1^2)/S^2) \times 100\% = ((0.3481 - 0.441)/0.3481) \times 100\% = 44.4\%.$$

就是说,110a 周期变化是北极涛动指数世纪变化十分重要的特征,其影响程度超过总的北极涛动指数异常变化的 44%!

根据 1889—2013 年 $AO(i)$ 资料分析其 110a 周期变化,一般来说由于资料长度不够长,可信程度不高.不过从图 4 看到, $AO(i)$ 实况资料与 110a 周期曲线基本吻合,说明 110a 周期基本反映了 100 多年来 $AO(i)$ 的变化趋势,所以,把这个准 110a 周期作为 1889—2013 年 $AO(i)$ 序列的趋势项来理解就可以了.

3.3 北极涛动的 22a 周期与太阳活动极性周期的联系

根据文献 Qu 等(2014)给出的太阳磁场磁性指数 22a 周期分量 $C_{22,MI}(i)$:

$$C_{22,MI}(i) = 0.448 \sin\left(\frac{2\pi}{22}i - 2.19\right),$$

$$(i = 1, 2, \dots, 265, \text{从 1749 年算起}). \quad (6)$$

为了分析太阳活动磁场异常变化与北极涛动 22a 周期变化的联系,将北极涛动 22a 周期分量曲线(粗实线)与太阳磁场磁性指数曲线(实线)绘于图 6 进行比较,将太阳磁场磁性指数(MI)准 22a 周期曲线(粗虚线)叠加到图 6,太阳磁场磁性指数 22a 周期分量是根据(6)式计算结果,截取 1900 年以后部分绘于图 6.可以看到磁性指数准 22a 周期曲线与 AO 22a 周期分量曲线(粗实线)变化趋势基本相反,MI 准 22a 周期波峰与 AO 22a 周期波谷相对应并有所超前,说明 AO 22a 周期乃 MI 准 22a 周期所激发.

由于 MI 准 22a 周期曲线与太阳磁场磁性指数曲线十分吻合,说明太阳磁场磁性指数准 22 年周期乃太阳磁场固有振荡周期,所以太阳磁场磁性指数曲线变化与 AO 22a 周期分量曲线变化趋势也基本相反,波峰波谷基本反相,太阳磁场磁性指数曲线波峰波谷超前于 AO 22a 周期分量曲线,二者波峰波谷取向比较固定,显示出太阳活动尤其是太阳磁场磁性指数变化与 1 月北极涛动 22a 周期变化密切的反相关关系.

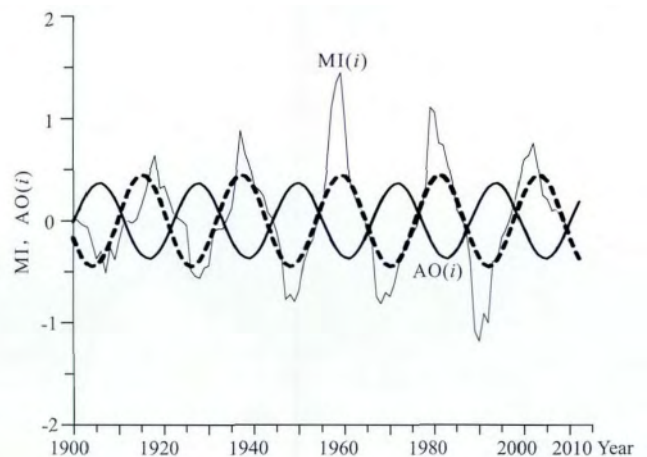


图 6 1 月 AO 22a 周期分量(粗实线),太阳磁性指数(除 150)曲线(实线)和太阳磁场磁性指数准 22a 周期曲线(粗虚线)

Fig. 6 The line of AO 22-year periodic component curve in January (heavy solid line), the MI of the solar magnetic field and quasi-22-year cycle curve of the MI of the solar magnetic field (heavy dotted line) in January

Qu 等(2007)指出, 太阳磁场磁性指数曲线从波谷到波峰时段是太阳磁场南向时期, 此时在太阳磁场的各种波长的扰动中, 其南向分量容易维持, 从而与地球磁场磁力线重联机会增多, 导致大量带电粒子输入地球磁层, 加热地球大气. 从图 6 可以看到, 1 月 AO 22a 周期分量(粗实线)从波峰到波谷时期正好对应着太阳磁场南向时期, 即太阳物质抛射加热北极区域地球大气, 极区大气偏暖, 对应着 AO 负位相时期.

相反, 太阳磁场磁性指数曲线波峰到波谷时段是太阳磁场北向时期, 此时在太阳磁场的各种波长的扰动中, 其南向分量不容易维持, 从而与地球磁场磁力线重联机会减少, 导致大量带电粒子从地球磁层外围滑过, 地球大气得不到加热. 从图 6 可以看到, 1 月 AO 22a 周期分量(粗实线)从波谷到波峰时期正好对应着太阳磁场北向时期, 即太阳物质抛射滑过地球, 无法加热北极区域地球大气, 极区大气偏冷, 对应着 AO 正位相时期.

4 结论

通过 AO 正负位相时期北半球 1000 hPa、700 hPa 位势高度和气温月平均图及距平图对比分析可知, 北极区域异常增暖时期对应着 AO 负位相时期, 而北极区域异常偏冷时期对应着 AO 正位相时期, 说明北极区域气温异常变化将决定 AO 异常变化符号.

逐次滤波法分析可知, 冬季 1 月北极涛动现象表现出十分清楚的与太阳活动密切联系的准 110a 世纪周期和准 22a 年代际周期, 具体表现为:

(1) 冬季 1 月北极涛动现象具有十分清楚的与太阳活动密切联系的准 110a 世纪周期. 准 110a 世纪周期对于北极涛动指数的方差贡献率达到 44.4%, 是冬季 1 月北极涛动现象最显著的世纪际变化特征.

(2) 谱分析结果表明, 滤除准 110a 世纪周期变化以后的 1 月北极涛动指数具有显著的 22a 周期, 其方差贡献率达到 18.5%, 乃仅次于准 110a 世纪周期之后北极涛动指数年代际变化重要特征. 对比分析表明, 太阳活动尤其是太阳磁场磁性指数变化与 1 月北极涛动 22a 周期变化呈密切的反相关关系, 二者变化趋势基本相反, 即多数情况当太阳磁性指数 MI 由最低值转为上升以后都可引起北极涛动 AO 由最高值转为下降; 当太阳磁性指数 MI 由最高

值转为下降以后都可引起北极涛动 AO 由最低值转为上升.

综上所述, 北极涛动的准 110a 世纪周期变化、22a 年代际周期变化对于北极涛动方差贡献率达到 62.9%, 标志着太阳活动是北极涛动的重要驱动因子.

References

- Friis-Christensen E, Lassen K. 1991. Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, 254(5032): 698-700.
- Friis-Christensen E. 1993. Solar activity variations and global temperature. *Energy*, 18(12): 1273-1284.
- Dong S L. 1997. A cause of evolution of solar magnetic field——Solar gyromagnetic effect. *Acta Astrophysica Sinica* (in Chinese), 17(1): 86-90.
- Gong D Y, Zhu J H, Wang S W. 2002. Significant correlation between the summer precipitation over Yangtze River and the former Arctic Oscillation. *Chinese Bulletin of Science*, 47: 546.
- Lean J, Beer J, Bradley R. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610, implications for climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 22(23): 3195-3198.
- Liu Y, Zhang H Q, Bao S D. 2001. A research on observation of solar magnetic field. *Progress in Astronomy* (in Chinese), 19(1): 34-44.
- Peristykh A N, Damon P E. 2003. Persistence of the Gleissberg 88-year solar cycle over the last ~12000 years: Evidence from cosmogenic isotopes. *J. Geophys. Res.*, 108(A1): 1003, doi: 10.1029/2002JA009390.
- Qu W Z, Deng S G, Huang F, et al. 2004. Influence of magnetic index abnormal change in the solar magnetic field on climate at the middle latitudes of North Hemisphere. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 47(3): 398-404.
- Qu W Z, Wang L N, Liu Y C, et al. 2003. Research of stratospheric climate anomaly variation in Northern Hemisphere. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 33(3): 329-336.
- Qu W Z, Zhao J P, Huang F, et al. 2012. Correlation between the 22-year solar magnetic cycle and the 22-year quasicycle in the earth's atmospheric temperature. *The Astronomical Journal*, 144(1): 6, doi: 10.1088/0004-6256/144/1/6.
- Qu W Z, Huang F, Zhao J P, et al. 2005. Arctic oscillation and the antarctic oscillation modes in the atmospheric stratosphere. *Acta Oceanologica Sinica*, 24(6): 46-53.
- Qu W Z, Huang F, Zhao J P, et al. 2007. The significance of solar magnetic field direction variation on anomalous variability of the atmosphere temperature on the earth. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(5): 1304-1310.
- Rigor I G, Colony R L, Martin S. 2000. Variations in surface air temperature observations in the Arctic. *J Climate*, 13(5): 896-

914.

- Shi Z X, Wang J X. 1994. Delta—sunspots and x class flares in solar cycle 22. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 14(1): 1-7.
- Thompson D W J, Wallace J M, Hegerl G C. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. part II: trends. *Journal of Climate*, 13(5): 1018-1036.
- Thompson DW, Wallace J M. 1998. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res. Lett.*, 25(9): 1297-1300.
- Xiong G M, Chen Q L, Jiang Y, et al. 2012. Relationship between Arctic oscillation and planetary waves in winter. *Journal of Chengdu University of Information Technology* (in Chinese), 27(3): 273-278.
- Zhang D H, Xiao Z. 2000. The study of ionospheric TEC during the flare on Nov 22, 98 by means of 4 GPS receivers over China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis* (in Chinese), 36(3): 416-421.
- Zhang Z D, Lin J, Chen J Y, et al. 1998. Researches on ideal MHD models of coronal mass ejections. *Progress in Astronomy* (in Chinese), 16(3): 196-209.

附中文参考文献

- 董士仑. 1997. 太阳磁场演变的起因之一——太阳的回磁效应. *天体物理学报*, 17(1): 86-90.
- 刘煜, 张洪起, 包曙东. 2001. 太阳磁场观测研究. *天文学进展*, 19(1): 34-44.
- 曲维政, 邓声贵, 黄菲等. 2004. 太阳磁场磁性指数异常变化对南北半球中纬度气候的影响. *地球物理学报*, 47(3): 398-404.
- 曲维政, 王丽楠, 刘应辰等. 2003. 北半球平流层气候异常变化探索. *青岛海洋大学学报*, 33(3): 329-336.
- 曲维政, 黄菲, 赵进平等. 2007. 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*, 50(5): 1304-1310.
- 史忠先, 汪景琇. 1994. 22 太阳活动周的 δ 黑子群与 X 级 X 射线耀斑. *空间科学学报*, 14(1): 1-7.
- 熊光明, 陈权亮, 蒋玥等. 2012. 冬季北极涛动与行星波活动的关系. *成都信息工程学院学报*, 27(3): 273-278.
- 张东和, 萧佐. 2000. 利用 GPS 方法对 1998-11-22 太阳耀斑引起的电离层 TEC 变化的观测研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 36(3): 416-421.
- 章振大, 林隽, 陈敬英等. 1998. 日冕物质抛射的理想 MHD 模型研究. *天文学进展*, 16(3): 196-209.

(本文编辑 胡素芳)