

冬季北半球平流层季节内振荡与 对流层季节内振荡的关系

李崇银^{1, 2} 程 胜³ 潘 静¹

1 中国科学院大气物理所大气科学和地球流体力学国家重点实验室, 北京 100029

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211001

3 浙江省湖州市气象局, 湖州 313000

摘 要 通过平流层大气 ISO 与对流层大气 ISO 的比较分析, 发现在中高纬地区平流层大气 ISO 与对流层大气 ISO 有着许多相同点。北半球冬半年平流层大气环流主要低频模态也可认为是北极涛动(AO), 其空间分布的主要特征为: 高纬度地区与中低纬度地区为反位相变化, 北极地区附近具有最大的变化值; 其季节内振荡的正位相对应于 AO 增强, 负位相对应于 AO 减弱。北半球冬半年平流层 100 hPa 和 70 hPa 位势高度场的低频遥相关分析表明, 北极地区(概指北纬 60°N 以北)和北半球其他大部分地区呈负相关, 北极涛动扮演了非常重要的角色。同时, 北半球冬半年平流层的主要低频波列是从欧亚大陆中部到西北太平洋, 并且由纬向型低频波列(欧亚大陆-西伯利亚-太平洋)和经向型低频波列(欧亚大陆-北极-太平洋)共同构成。平流层 30 hPa 和对流层 500 hPa 上经过带通滤波(15~90 d)位势高度场的 EOF 第一主分量的形势有十分类似的特征, 它们对应的时间系数序列有显著的延迟相关关系。因此可以认为, 北半球平流层大气 ISO 的变化要先于对流层大气, 在滞后 35 d 左右其相关系数达到最大。大气环流模式(SAMIL)的数值模拟试验结果也表明, 平流层的低频扰动可以在 14 d 之后便在对流层 500 hPa 上激发出低频响应, 其谱峰在 30 d 左右。这进一步表明, 通过大气季节内振荡, 平流层的异常可以影响到对流层。

关键词 冬季 平流层 对流层 大气季节内振荡

文章编号 1006-9895(2006)05-0744-09

中图分类号 P461

文献标识码 A

The Relationship Between the Intraseasonal Oscillations in the Northern Hemisphere During the Boreal Winter in the Stratosphere and Troposphere

LI Chong-Yin^{1, 2}, CHENG Sheng³, and PAN Jing¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

3 Huzhou Meteorological Bureau, Huzhou 313000

Abstract The intraseasonal oscillation (ISO) is a fundamental phenomenon in the atmosphere. It not only exists in the troposphere of the tropics, but also plays an important role in the atmospheric circulation of the stratosphere. In this paper, the characteristics of the ISO in the troposphere and stratosphere are compared. The result shows that there are significant similarities between the the ISO over the high-latitude areas in the troposphere and stratosphere. The Arctic Oscillation (AO) is the most significant low-frequency mode of the Northern Hemisphere (NH) during the boreal winter both in the high/low level of the atmosphere. The feature of its spatial distribution is char-

acterized as a “seesaw” pattern in atmospheric mass between the polar cap regions poleward of 60°N and the surrounding zonal rings centered near 45°N . The most significant variation happens in the polar cap. The positive phase of the ISO stands for the strengthening of the AO, while the negative phase of the ISO is for the weakening of the AO. The teleconnection patterns of the Northern Hemisphere (NH) during the boreal winter in 100 hPa and in 70 hPa (stratosphere) are also investigated. The teleconnection distribution shows there are negative correlation between the polar cap areas and the other areas. The AO dominates the intraseasonal (low-frequency) climate variability in the stratosphere. It also can be seen from the teleconnection distribution that the main low-frequency wave train is from the middle Euroasia land to the northwest Pacific, which consists of the zonal low-frequency wave train (Euroasia land – Siberia – Pacific) and the meridional low-frequency wave-train (Euroasia – Polar – Pacific).

The relationship between the ISO in the stratosphere and troposphere is also studied in this paper. The pattern of the leading empirical orthogonal function (EOF) of the band-flittered geopotential height in the stratosphere (30 hPa) and troposphere (500 hPa) are similar. There is also significant lag correlation between the principal component time series. It is shown in the analysis that the variability of the ISO in the stratosphere in the NH during the winter is ahead of the one in the troposphere, and the leading period is about 30 days. The SAMIL model is also used to do the numerical simulation. The result testifies that the low-frequency disturbance in the stratosphere can excite the low-frequency responses in the troposphere after 14 days, and the reaction would become the strongest after about 30 days. It makes clear that the anomalies in the stratosphere can pose an influence on the troposphere through the ISO activity.

Key words boreal winter, stratosphere, troposphere, intraseasonal oscillation

1 引言

对流层的大气季节内振荡已被视为重要的大气环流系统之一, 它的活动及其异常对不少地区的天气和气候都有重要的影响, 从而受到人们的极大重视。在热带大气中, Madden 和 Julian^[1] 通过谱分析首先发现太平洋地区风场和气压场的变化存在 40~50 d 的周期性振荡现象。其后, 他们又证明这种准周期低频振荡在全球热带大气中普遍存在^[2]。因此, 也有人把热带大气季节内振荡称之为 Madden 和 Julian 波 (振荡), 或者 MJO。通过对 MONEX 资料的分析, Krishnamurti 和 Subrahmanyam^[3] 以及 Murakami 等^[4] 先后指出了南亚夏季风活动存在着明显的 30~50 d 振荡, 并研究得到了这种低频振荡的一些基本活动规律。其后, 有关热带大气 30~60 d 振荡的研究便蓬勃开展起来, 这些研究^[5~8] 不仅把 30~60 d 振荡作为大气运动的准周期变化现象, 而且视其为大气运动的一类实体 (系统), 研究其结构特征、传播规律和动力学机制。

对流层中高纬度地区大气 ISO 的存在、结构和传播特征, 及其与热带大气 ISO 的差别也已有不少研究^[9~11]。大气季节内振荡在中高纬度地区是普遍存在的, 尤其是在高纬度地区更加明显。中高纬度大气 ISO 的纬向尺度主要表现为 1~4 波, 以纬向

3 波占主要地位; 其纬向传播以西传为主, 具有地域性; 基本是高低空同位相的正压结构。

对流层大气 ISO 在气候系统中的重要作用也是十分明显的。研究表明大气季节内振荡的活动对亚洲夏季风的爆发有重要作用^[12]; 大气季节内振荡的活动对亚洲夏季风的异常也有重要影响^[13]; 大气季节内振荡的异常对 ENSO 的发生也有作用^[14, 15]。

在北半球冬季, 平流层大气环流的变化主要受极涡控制, 其变化周期为几个星期到几个月^[16, 17], 这显然表明平流层大气环流也存在着低频变化 (ISO)。但有关平流层大气季节内振荡的研究相对还比较少, 在最近研究了平流层大气 ISO 的特征、活动规律及其与对流层 ISO 相比较的基础上^[18], 本文将研究平流层大气季节内振荡影响对流层大气季节内振荡的问题, 揭示平流层大气环流变化通过大气季节内振荡而影响对流层大气环流的途径和机制, 从而可以适当用平流层大气环流的低频变化来预报对流层大气环流, 为短期气候预测提供一种科学方法。

2 资料和计算方法

本文主要使用 NCEP/NCAR 位势高度场和风场的逐日再分析资料 (1970~1999 年), 其分辨率

为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 主要计算层次是 30 hPa、50 hPa、70 hPa、100 hPa。

在采用带通 (15~90 d) 滤波器对资料进行带通滤波, 从而得到北半球冬半年平流层大气季节内振荡的基本特征和形式的基础上, 再通过奇异值分解 (the singular value decomposition 简称 SVD) 等方法, 研究并揭示北半球冬半年平流层大气环流变化的主要模态, 以及平流层大气 ISO 与主要环状模的关系; 然后从遥相关的角度, 研究和分析平流层大气 ISO 的主要低频遥相关型 (模态), 并与对流层的低频遥相关模态进行对比分析; 再用数值试验进一步分析研究北半球平流层季节内振荡与对流层大气 ISO 的关系。

3 北半球平流层大气 ISO 与主要低频模的关系

在北半球冬季, 北半球环状模 (Northern Hemisphere annular mode 简称 NAM) 是北半球冬季气候变化的主要模态, 它与北半球平流层环流紧密地耦合在一起。NAM 是一种复杂的近似正压的结构, 并且沿 55°N 的纬向风扰动与沿 35°N 的纬向风扰动反向。在平流层大气中, NAM 的主要变化周期为几个星期, 这与我们讨论的平流层大气 ISO 的变化周期是一致的, 我们可以把 NAM 的演变 (季节内) 看作是大气 ISO 变化的一种模态。在地面和低层大气, NAM 被称为北极涛动 (AO)。实质上, 北半球环状模 (NAM) 和北极涛动 (AO) 所反映的是同一种大气环流特征, 一般 NAM 被用作表示复杂的耦合模态。本文均以 AO 代表北半球冬季大气环流的主要模态。

对北半球冬季平流层的位势高度场和风场进行的功率谱分析和小波分析结果都表明平流层大气具有 15~90 d 的显著低频变化周期, 即北半球冬半年平流层大气有显著的季节内振荡特征。

分析研究已表明, 北半球冬季平流层大气 ISO 的水平结构与对流层有所差别, 在高纬度地区平流层大气季节内振荡在位势高度场上主要表现为纬向 1~2 波, 并且以纬向 1 波占优势; 在中纬度地区, 平流层大气季节内振荡在位势高度场上主要表现为纬向波数 2~3。尤其值得提出的是平流层大气季节内振荡以在高纬地区最为显著, 并且以北极地区为中心。大气 ISO 的动能分布也表明, 平流层大气

ISO 的扰动动能最大值区是在高纬度地区, 同平流层大气的 AO 分布特征有密切关系。这种与 AO 的密切关系主要是由于在高纬度地区大气运动受到 AO 的突出影响 (低频尺度), 使得大气 ISO 的地域分布和变化都体现了 AO 的特征。而且越往平流层高层, 大气 ISO 在高纬度地区就越为显著。

为了弄清楚北半球冬半年平流层大气环流主要低频模态, 我们对北半球不同等压面上的位势高度场 (经过滤波后的资料) 进行了奇异值分解 (SVD)。其结果都表明, 北半球冬半年平流层主要的低频系统是北极涛动 (AO), 在北半球冬半年平流层大气环流演变中, 北极涛动占据主导地位。

图 1 给出 1970~1980 年北半球冬半年 50 hPa 和 100 hPa 位势高度场的奇异值分解, 这里给出的是第一模态, 其 SCF (squared covariance fraction) 值为 0.44, 左场是 50 hPa 位势高度场, 右场是 100 hPa 位势高度场。由图 1 我们可以明显地看到, 在北半球冬半年平流层中层和下层的大气环流的一致性很清楚, 即它们之间是一种正相关的关系, 这与平流层大气季节内振荡的垂直结构特征是一致的。在同一位势高度场上, 存在两条零线 (相关系数值为零的等值线), 其所在纬度大致为 60°N 和 20°N 左右, 并且以这两条零线将北半球分为三部分; 60°N 以北的高纬地区是一个以北极为中心的负值区; $20^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 的带状区域是一个正值区, 其中在 45°N 附近存在 3 个大值中心, 分别位于欧亚大陆中部地区、北太平洋和北大西洋上空; 20°N 以南到赤道地区是一个负值区。显然, 高纬地区的低频位势扰动与中纬地区呈负相关, 与低纬地区则呈正相关的关系, 并且在极区附近地区, 其相关系数都非常大。这说明平流层中层和下层位势扰动的低频变化趋于一致, 且在极区最显著, 可能是它们都是受北极涛动的影响所致。

由于北半球冬半年平流层大气环流主要低频模态是北极涛动 (AO), 所以我们对滤波之后的位势高度场资料作经验正交分解 (EOF), 主要对第一模态进行讨论, 以进一步分析 AO 的主要时空特征。图 2 是不同等压面上的位势高度场 (15~90 d 带通滤波) 经过 EOF 分解得到的第一主分量的分布情况。这里 EOF 分解所取的区域均为 ($20^{\circ}\text{N} \sim 90^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ} \sim 360^{\circ}\text{E}$)。由图 2 可见, 不论是在哪个层次上, 位势高度场低频变化的 EOF 第一主分量的

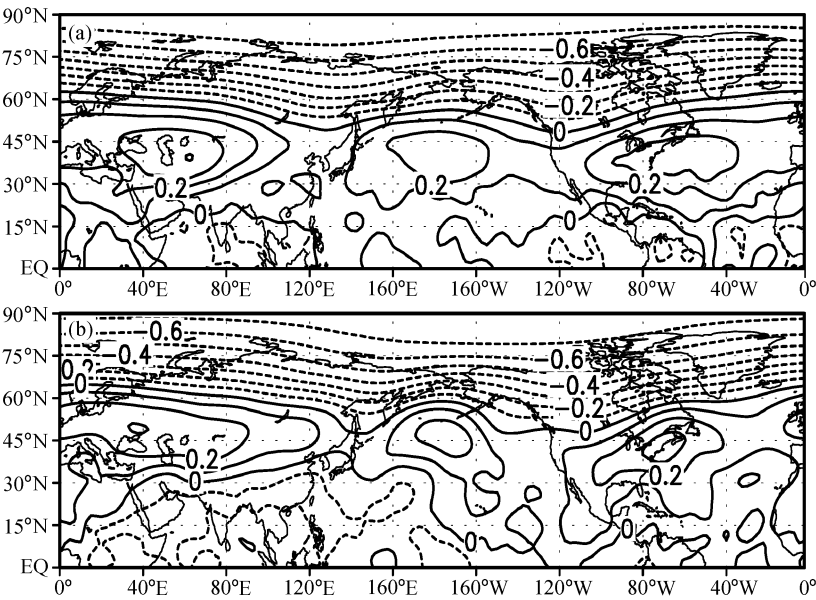


图 1 1970~1980 年冬半年 50 hPa (a) 和 100 hPa (b) 位势高度场的奇异值分解结果 (等值线间隔为 0.1)

Fig. 1 The singular value decomposition about the geopotential height fields at 50 hPa (a) and 100 hPa (b) in the wintertime from 1970 to 1980. The contour intervals are 0.15.

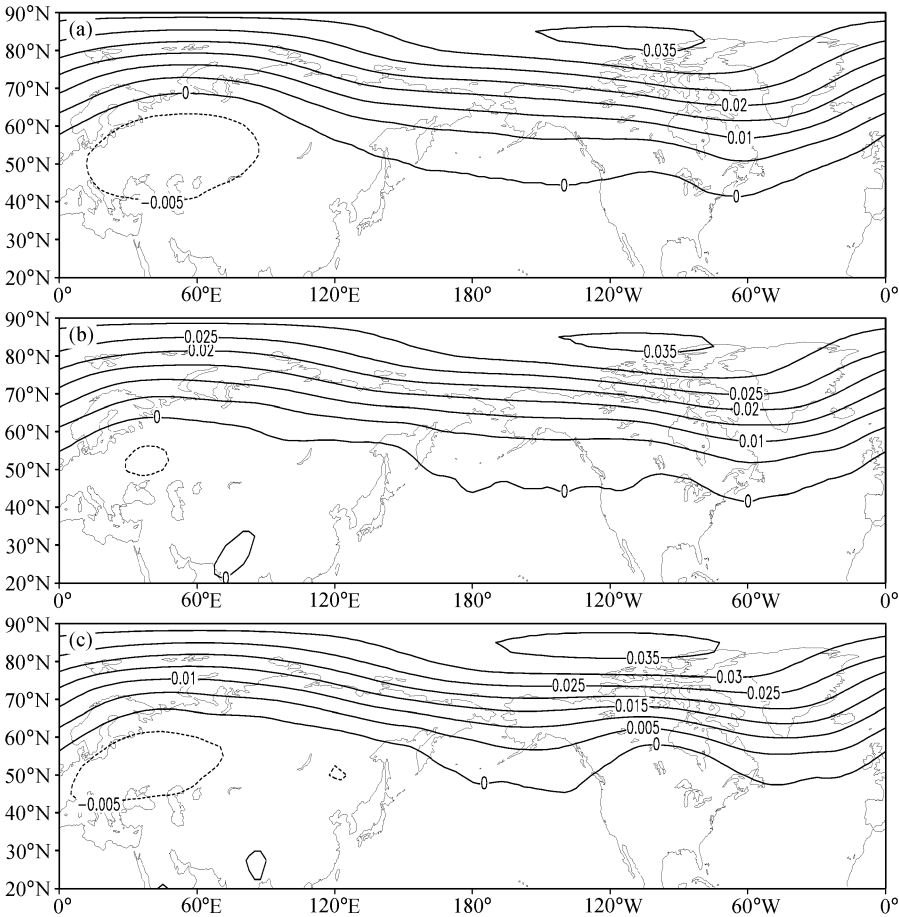


图 2 不同等压面上带通 (15~90 d) 滤波的位势高度场经过 EOF 分解的第一主分量; (a) 30 hPa; (b) 50 hPa; (c) 70 hPa

Fig. 2 The EOF1 (the first EOF component) spatial patterns of the filtered (15-90 d) geopotential heights at 30 hPa (a), 50 hPa (b) and 70 hPa (c)

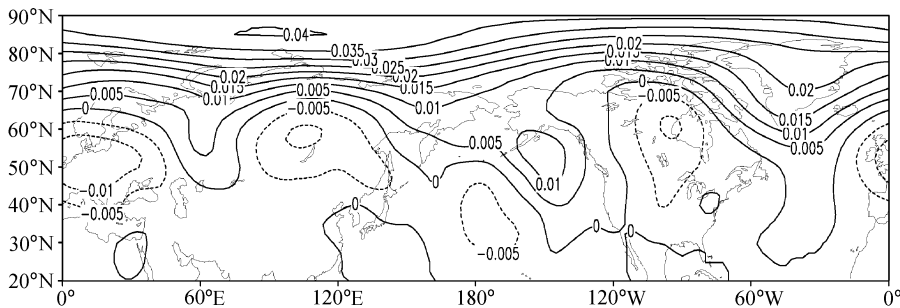


图3 500 hPa 带通 (15~90 d) 滤波的位势高度场的 EOF 第一主分量场

Fig. 3 The EOF1 spatial patterns of the filtered (15–90 d) geopotential heights at 500 hPa

空间型分布都是非常相似的,其空间分布的主要特征为:高纬度地区与中低纬度地区为反位相变化,北极地区附近具有最大的变化值。本文得到时间系数序列的方法与文献[19]定义 AO 指数的方法类似,它是一种经过带通滤波的 AO 时间序列,其正位相对应于 AO 增强,负位相对应于 AO 减弱,对应的时间序列表现为明显的季节内振荡特征(时间序列图略)。

4 平流层季节内振荡对对流层的影响

Baldwin 等^[20]的研究结果表明,平流层 AO 的演变要先于对流层 AO 的演变。同样,我们对平流层大气 ISO 与对流层 ISO 滞后相关的计算结果也很好地说明了这一点。这表示对平流层极地涡旋演变的研究可以在一定程度上有效地预测北半球冬季的天气(指在季节内和季节尺度上),并且也可为连接大气上下层之间的动力关系提供大致的框架。

为了研究平流层大气 ISO 和对流层大气 ISO 之间的相互关系,我们选取对流层中层 500 hPa 的位势高度场作为参照。图 3 是对流层 500 hPa 经过带通滤波 (15~90 d) 的位势高度场异常经过 EOF 分解的第一主分量场。同样,EOF 分解所取的区域为 (20°N~90°N, 0°~360°E)。在 500 hPa,位势高度场低频变化的 EOF 第一分量空间型的主要特征为:高纬度地区与中低纬度地区反位相变化,北极地区附近具有最强变化。同样,位势高度场低频变化的第一模态反映了对流层典型的 AO 位相结构,以及 AO 与北半球其他地区位势高度场异常有同时性关系的特征。在中纬度,与 AO 呈反位相变化较为显著的区域为南欧、贝加尔湖地区和北美大陆地区。

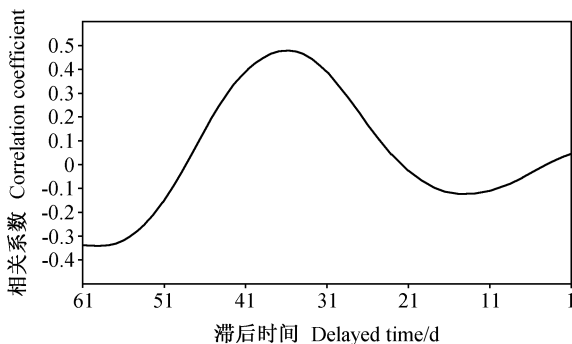


图4 30 hPa 的 EOF 第一主分量时间系数序列与 500 hPa 对应的时间系数序列间的延迟相关分析

Fig. 4 The delayed correlation diagram of the EOF1 time coefficient at 30 hPa and that at 500 hPa

比较图 2 和图 3,我们可以看出对流层 AO 的空间分布与平流层 AO 的分布是非常相似的。由于在平流层,不同层次的 EOF 第一主分量所对应的时间系数序列有着良好的相关性,所以可选取 30 hPa 作为平流层的代表层次,将 30 hPa EOF 第一主分量的时间系数序列与 500 hPa 对应的时间系数序列作延迟相关分析(图 4)。从图 4 可以看出,北半球平流层大气 ISO 变化先于对流层大气,在滞后 35 d 左右其相关系数达到最大,并且通过了 99% 信度检验 ($r_c = 0.23$)。比较其他层次所得到的结果(图略),我们可以得出相同的结论,即北半球平流层大气 ISO 变化先于对流层大气。但是,我们并没有看到平流层大气低频扰动如何明显向下传播的现象,平流层大气 ISO 如何向下传播而影响对流层大气 ISO 的过程还有待进一步研究。

5 北半球平流层主要低频遥相关模态

有关对流层大气 ISO 的研究表明,对流层存在

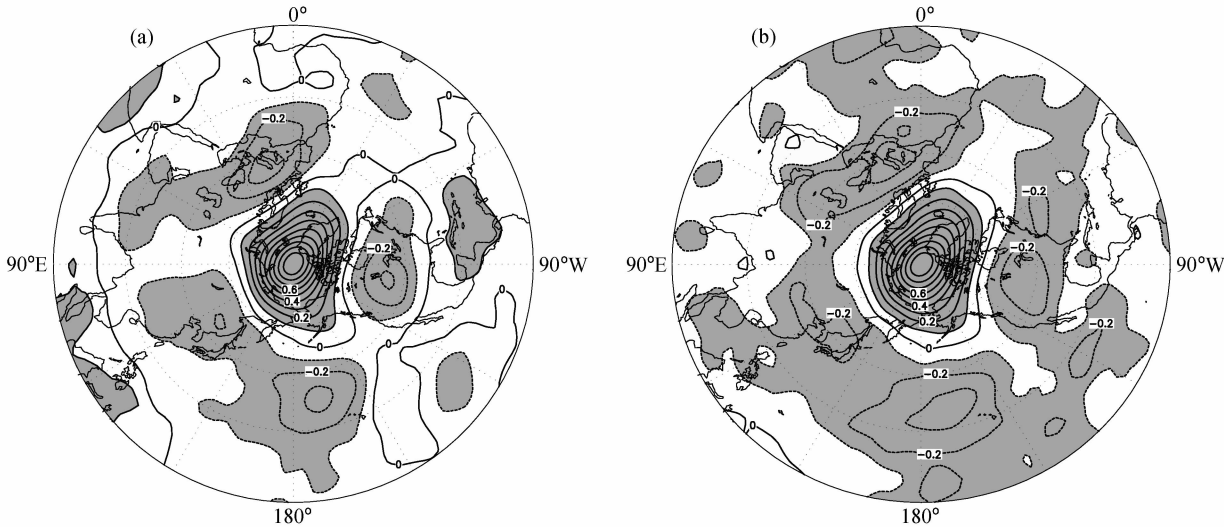


图 5 1970~1980 年北半球冬半年平流层 100 hPa (a) 和 70 hPa (b) 位势高度场的低频遥相关分布。计算参考点为 (87.5°N, 160°E)，阴影为超过 99% 信度检验的区域

Fig. 5 The correlation coefficients of the filtered geopotential height at (a) 100 hPa and (b) 70 hPa in the wintertime from 1970 to 1980. The contour intervals are 0.1, and the reference point at (87.5°N, 160°E). Shading denotes region over 99% significance level

全球范围的大气低频波列(遥相关)特征,而且这种低频遥相关与一般的主要遥相关型(如 EUP 等)都有着很类似的特征^[21]。下面,我们将从遥相关的角度,研究北半球平流层的主要低频遥相关模态。

利用 15~90 d 带通滤波的位势高度场数据,通过对北半球不同参考点进行低频遥相关系数的计算,我们可以得到北半球冬半年平流层大气的主要低频相关模态。由于前文 EOF 的结果显示北极地区是平流层低频变化的显著区域,我们选取极区(87.5°N, 160°E)作为基点,计算全球不同等压面位势高度场的低频遥相关。由于所得的结果都非常相似,这里我们给出 1970~1980 北半球冬半年平流层 100 hPa 和 70 hPa 位势高度场低频遥相关图(图 5)。因样本数目较多,所有正负中心都通过了 99% 的信度检验。总的来说,北极地区(概指北纬 60°N 以北)和北半球其他大部分地区呈负相关,这是由于在北半球冬半年平流层大气中,北极涛动扮演了非常重要的角色。同时,从图 5 中还可以看到有类似 PNA 和 EUP 两个遥相关波列的特征,尤其是在 100 hPa 上。这在一定程度上表明,对流层的低频行星波列在平流层低层也有所反映。

从图 5 中可以看到在低频变化上,北极地区和

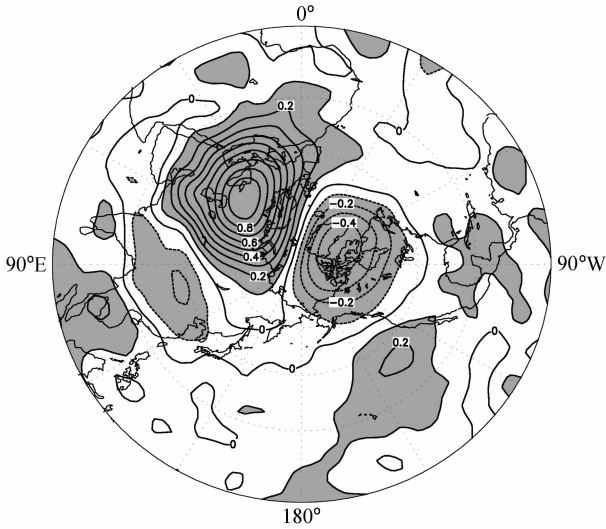


图 6 经过 15~90 d 带通滤波的 50 hPa 位势高度场的遥相关图 [参考点为 (50°N, 40°E)]

Fig. 6 The teleconnection diagram of the filtered (15 - 90 d) geopotential height at 50 hPa. The reference point is (50°N, 40°E)

北大西洋地区呈负相关,北太平洋地区和北美地区呈正相关。这些特征与文献^[22]的低频相关模态十分类似。

参照 EOF 的分析结果,我们知道在南欧地区是与平流层 AO 呈反向变化的显著地区,所以我们选取 (50°N, 40°E) 作为基点,计算得到 50 hPa 高度场点点相关图(图 6),进一步揭示平流层大气的

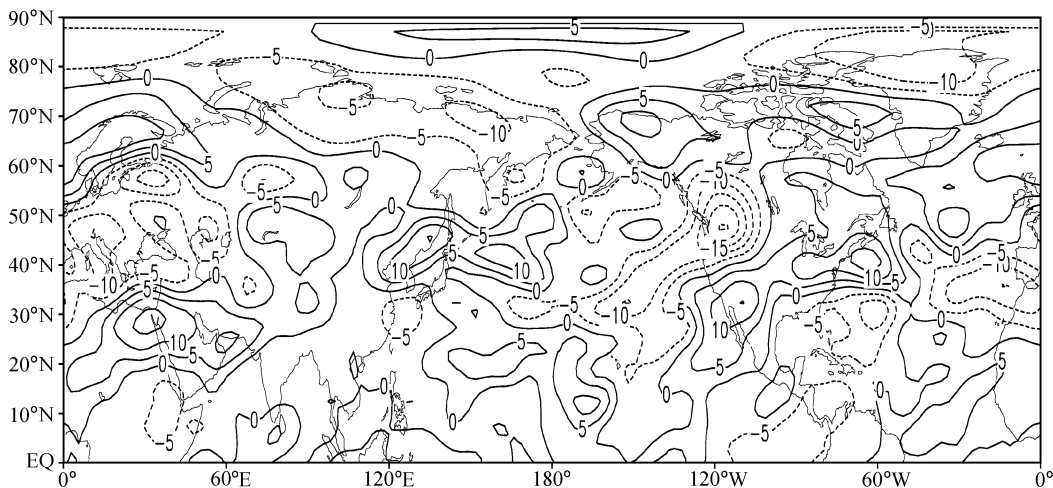


图7 异常试验和对照试验在第14天的500 hPa纬向风差值(单位; m/s)分布

Fig. 7 The distribution of 500 hPa zonal wind differences (m/s) on the 14th day between the control run and anomalous run

主要低频遥相关模态。由于样本数目较多,图6的所有正负中心都通过了99%的信度检验。与在图5所示结果一致的是北极地区和其他地区呈负相关,北太平洋地区和北美地区呈正相关。在图6上,我们发现从欧亚大陆中部到西北太平洋有遥相关波列存在,欧亚大陆的中部地区(伊朗高原)-西伯利亚地区-北太平洋地区以“+ - +”的形式构成纬向型低频波列,而欧亚大陆-北极地区-北太平洋地区以“- + -”的形式构成了一种经向型低频波列。并且,欧亚大陆的中部地区(伊朗高原)-西伯利亚地区-太平洋地区以“- + -”形式还构成了EUP型遥相关,且与在对流层大气环流中看到的EUP型遥相关相当类似。

综上所述,平流层大气主要的低频遥相关模态分布是:北极地区(概指北纬 60°N 以北)和北半球其他大部分地区呈负相关;北太平洋地区和北美地区呈正相关。其主要的低频波列是从欧亚大陆中部到西北太平洋,并且由纬向型低频波列(欧亚大陆-西伯利亚-太平洋)和经向型低频波列(欧亚大陆-北极-太平洋)共同构成。

6 平流层大气 ISO 影响对流层的数值模拟试验

为了进一步揭示平流层低频振荡(扰动)对对流层环流的影响,我们采用中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室(LASG)发展的大气环流谱模式(SAMIL)进行了

数值模拟试验。SAMIL^[23]已在不少研究工作中得到了应用^[24, 25],其模拟效果还比较好。

我们在用SAMIL进行10年数值积分的基础上得到了一个10年平衡态,再从12月1日开始,进行对照试验和异常试验两个积分,每个积分都到次年的3月31日。对照试验中不加任何强迫扰动,而异常试验中在平流层加入了异常扰动,即在平流层的($50.6^{\circ}\text{N}\sim 60.6^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\text{E}\sim 160.3^{\circ}\text{W}$)区域加入了纬向风的异常,这里的纬向风异常是用NCEP资料经15~90 d带通滤波得到的数值序列。

对照试验和异常试验积分结果的对比分析清楚地表明,在积分14天左右,对流层500 hPa流场已有十分明显的差异。也就是说,在14天左右平流层的季节内振荡(扰动)就会在对流层500 hPa有明显的响应。图7是对照试验和异常试验分别积分到14天时,在北半球500 hPa上的纬向风差异的空间分布,图中的大值中心都在10 m/s以上,表明两个试验的差异是十分明显的。也可以认为,平流层的季节内振荡(扰动)在14天左右已明显影响到对流层的大气环流。

为了揭示在对流层500 hPa上对平流层低频扰动的响应形式,我们用对应平流层扰动地区的500 hPa纬向风异常序列作morlet小波分析,其结果如图8所示。很显然,500 hPa纬向风的响应以30天左右的低频谱为最强。也就是说,对流层环流对平流层低频振荡的响应主要是30天为主要周期的低频响应。

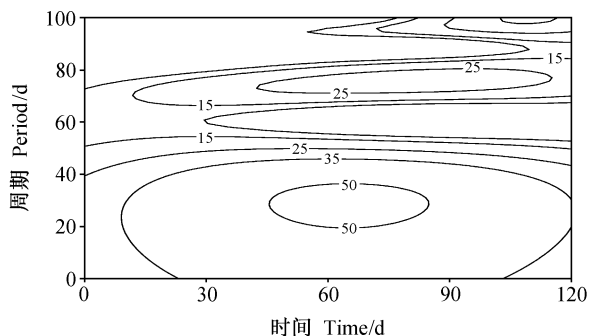


图 8 500 hPa 纬向风响应 (异常) 的小波分析结果

Fig. 8 The wavelet analysis of zonal wind responses at 500 hPa to the stratosphere low frequency fluctuation

7 结语

季节内振荡普遍存在于全球大气之中, 它可以说是全球大气运动的基本特征之一。虽然平流层大气季节内振荡无论是在空间结构, 还是在传播规律上都与对流层大气季节内振荡有一定的区别, 但通过平流层大气 ISO 与对流层大气 ISO 的比较分析, 我们发现在中高纬地区平流层大气 ISO 与对流层大气 ISO 有着许多相同点。ISO 在平流层和对流层的差异主要存在于低纬度地区, 造成这种差异的原因可能是由于下垫面的不同影响, 以及在赤道地区的积云对流加热反馈对热带对流层大气 ISO 的激发作用造成的。

北半球冬半年平流层大气环流主要低频模态是北极涛动 (AO), 其空间分布的主要特征为: 高纬度地区与中低纬度地区为反位相变化, 北极地区附近具有最大的变化值。经过带通滤波的 AO 时间序列表现为明显的季节内振荡特征, 其正位相对应于 AO 增强, 负位相对应于 AO 减弱。

平流层 30 hPa 和对流层 500 hPa 上经过带通滤波 (15~90 d) 的位势高度场的 EOF 第一主分量的形势有十分类似的特征, 它们对应的时间系数序列有显著的延迟相关关系。因此可以认为, 北半球平流层大气 ISO 的变化要先于对流层大气, 在滞后 30 天左右其相关系数达到最大。

1970~1980 年北半球冬半年平流层 100 hPa 和 70 hPa 位势高度场的低频遥相关分析表明, 北极地区 (概指北纬 60°N 以北) 和北半球其他大部分地区呈负相关, 北极涛动扮演了非常重要的角色。同时, 北半球冬半年平流层的主要低频波列是

从欧亚大陆中部到西北太平洋, 并且由纬向型低频波列 (欧亚大陆-西伯利亚-太平洋) 和经向型低频波列 (欧亚大陆-北极-太平洋) 共同构成。

用中国科学院大气物理研究所 LASG 发展的大气环流谱模式 (SAMIL) 进行的数值模拟试验结果表明, 平流层的低频扰动可以在 14 天之后便在对流层 500 hPa 上激发出低频响应, 其谱峰在 30 天左右。这进一步表明, 通过大气季节内振荡, 平流层的异常可以影响到对流层。

参考文献 (References)

- [1] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40 - 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**: 702~708
- [2] Madden R A, Julian P R. Description of globe-scale circulation cells in the tropics with a 40 - 50 day period. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**: 1109~1123
- [3] Krishnamurti T N, Subrabmanyam D. The 30 - 50 day mode at 850 mb during MONEX. *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**: 2088~2095
- [4] Murakami T, Nakazawa T, He Jinhai. On the 40 - 50 day oscillation during the 1979 Northern Hemisphere summer, Part I: Phase propagation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1984, **62**: 440~468
- [5] Lau N C, Lau K M. The structure and propagation of intraseasonal oscillations appearing in a GFDL general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 2023~2047
- [6] Knuston T R, Weickmann K M. 30 - 60 day atmospheric oscillations: composite life cycles of convection and circulation anomalies. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 1407~1436
- [7] 李崇银. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1993
Li Chongyin. *Low Frequency Oscillations in the Atmosphere* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993
- [8] 李崇银. 气候动力学引论 (第二版). 北京: 气象出版社, 2000. 287~297
Li Chongyin. *Introduction to Climate Dynamics* (second edition) (in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 2000. 287~297
- [9] Anderson J R, Rosen R D. The latitude-height structure of 40 - 50 day variations in atmospheric angular momentum. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 1584~1591
- [10] Li Chongyin, Wu Peili. An observational study of the 30 - 50 day atmospheric oscillation. Part I: Structure and propagation. *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7**: 294~304
- [11] 李崇银. 30 - 60 天大气振荡的全球特征. 大气科学, 1991, **15** (3): 66~76
Li Chongyin. The global characteristics of 30 - 60 day atmospheric oscillation. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmo-*

- spherica Sinica*) (in Chinese), 1991, **15**: 130~140
- [12] 穆明权, 李崇银. 1998 年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动. 气候与环境研究, 2000, **5**: 375~387
Mu Mingquan, Li Chongyin. On the outbreak of South China Sea summer monsoon in 1998 and the activity of atmospheric intraseasonal oscillation. *Climate and Environment Research* (in Chinese), 2000, **5**: 375~387
- [13] Li Chongyin, Mu Mingquan, Long Zhenxia. Influence of intraseasonal oscillation on East-Asian summer monsoon. *Acta Meteor. Sinica*, 2003, **17**: 130~142
- [14] 李崇银, 周亚萍. 热带大气季节内振荡和 ENSO 的相互关系. 地球物理学报, 1994, **37**: 17~26
Li Chongyin, Zhou Yaping. Relationship between Intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere and ENSO. *Chinese J. Geophys.*, 1994, **37**: 213~223
- [15] 龙振夏, 李崇银. 热带低层大气 30~60 天低频动能的年际变化与 ENSO 循环. 大气科学, 2001, **25**: 798~808
Long Zhenxia, Li Chongyin. Interannual variations of tropical atmospheric 30 - 60 day low - frequency oscillation and ENSO cycle. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2002, **26**: 51~62
- [16] Yoden S. An illustrative model of seasonal and interannual variations of the stratospheric circulation. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 1845~1853
- [17] Scott R K, Haynes P H. Internal interannual variability of the extratropical stratospheric circulation: The low-latitude flywheel. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998, **124**: 2149~2173
- [18] 程 胜, 李崇银. 北半球冬半年平流层大气低频振荡特征的研究. 大气科学, 2006, **30**: 660~670
Cheng Sheng, Li Chongyin. The features of the winertime stratospheric atmospheric low-frequency oscillation in the Northern Hemisphere. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30**: 660~670
- [19] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 1297~1300
- [20] Baldwin M P, Dunkerton T J. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 30937~30946
- [21] Li Chongyin, Zhang Qing. Global atmospheric low-frequency teleconnection. *Progress in Natural Sciences*, 1991, **1**: 447~452
- [22] Hisanori I, Harada K-I. Coupling between tropospheric and stratospheric leading modes. *J. Climate*, 2004, **17**: 320~336
- [23] 周天军, 宇如聪, 王在志, 等. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGALS-s——亚洲季风区海-陆-气相互作用对我国气候变化的影响(第四卷). 北京: 气象出版社, 2005. 53~89
Zhou Tianjun, Yu Rucong, Wang Zaizhi, et al. *The Atmospheric General Circulation Model SAMIL and Its Associated Coupled Climate System Model FGOALS-s, Volume 4 of Impacts of the Ocean-Land-Atmosphere Interaction over the Asian Monsoon Domain on the Climate Change over China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2005. 53~89
- [24] Liu Hui, Wu Guoxiong. Impacts of land surface on climate of July and onset of summer monsoon: A study with an AGCM plus SsiB. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**: 289~308
- [25] Wang Zaizhi, Wu Guoxiong, Wu Tongwen, et al. Simulation of Asian monsoon seasonal variations with climate model R42L9/LASG. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 879~889