

与北极涛动或北半球环状模相关的纬向 对称的正规模态^{*}

赵 南

(中国气象科学研究院, 灾害性天气国家重点实验室, 北京, 100081)

Masaaki Takahashi

(Center for Climate System Research, University of Tokyo)

摘 要

作为一个全球气候变率的重要模态, 北极涛动或北半球环状模态 (AO/NAM) 一般由北半球海平面气压变率的 EOF1 来表示。但是通常认为 EOF1 仅有统计学意义而并不能够表明它是否是一种实际的物理模态。另一方面, 现有的波-流相互作用理论也仅能给出纬向风的纬向平均状况, 而不能保证沿着某一纬圈的变化, 所以它并不意味着一个具有半球尺度的纬向对称的相干结构能够组织起来。因此 AO/NAM 的形成机制仍然是一个具有争议的问题。文章提出纬向对称的或环状的正规模态与基本气候态附近的线性(进而非线性)动力学之间有着最直接的联系, 因而可能在 AO/NAM 动力学的理解中扮演重要角色。为了深入探讨 AO/NAM 的动力学本质, 使用 p -坐标球面原始方程计算了冬季北半球及全球气候基本态附近的线性动力系统纬向对称的正规模态, 发现在半球尺度上的纬向对称正规模态具有 AO/NAM 的经向偶极子及垂直方向近似正压的空间结构特征。而这些纬向对称正规模的时间变化尺度取决于与其他非纬向对称正规模间的相互作用。从而说明了 AO/NAM 可能是半球尺度上纬向对称正规模态的动力学行为的反映。

关键词: 北极涛动, 北半球环状模, 纬向对称正规模态, 气候变率。

1 引 言

近年来, 北极涛动 (AO) 或北半球环状模态 (NAM) 作为一种在北半球尺度上的具有纬向对称结构的大气环流变率的首要模态吸引着众多研究者的注意^[1~4]。这一模态的重要性在于其对全球天气气候变化诸方面的影响, 如气候月平均变化、阻塞、极端天气事件及 20 世纪 70 年代以来的全球气候变化趋势都与之有密切相关。同时也发现 AO/NAM 和平流层及热带大气环流存在着相互联系。许多有关 AO/NAM 的研究揭示了这一模态的维持主要是由于纬向平均流与波动间的正反馈相互作用导致的^[5~8]。在北半球, 无论是斜压波还是准定常波都会与纬向平均流发生相互作用, 从而引起该环状模态的涛动。

尽管波-流相互作用理论给出了有关 AO/NAM 激发机制的总体描述, 但迄今为止有关 AO 动力学的基本问题仍在讨论当中。众所周知, AO 通常用北半球 (20°~90°N) 海平面气压变率的 EOF 的第一主分量来代表。但这对于 AO 动力学的理解来说是不充分的。许多研究者认为 EOF 只具有统计的意义, 因为它仅反映某种空间型出现的概率大小, 而不能表明 AO 与导致这一在半球尺度上一致的变率的物理或动力过程间的联系, 因而不能确定它是不是某种实际的物理模态。另一方面, 波-流相互作用理论也仅能给出纬向风的纬向平均状况, 它不能保证沿着某一纬圈的一致变化, 所以它并不意味着一个具有半球尺度的纬向对称的相干结构能够组织起来。总之, 我们需要搞清楚 AO/NAM 究竟是否为半球尺度的物理模态、如何维持的。

* 初稿时间: 2005 年 1 月 29 日; 修改稿时间: 2005 年 8 月 16 日。

资助课题: 国家自然科学基金 (40545019)。

与此同时,纬向对称的或环状的正规模态却与基本气候态附近的线性(进而非线性)动力学之间有着最直接的联系。因而可能在 AO/NAM 动力学的理解中扮演重要角色。尽管这一观点看起来非常自然,因为正规模作为动力系统的线性部分的解必然是相干的物理模态,但是,由于以下两点原因,人们忽略了它的重要性。第一,目前还缺乏关于半球尺度的纬向对称的正规模态知识。第二,传统的解析的线性正规模分析在这一尺度上仅能给出衰减的并且是规则振荡的固有模态,这与实际观测到的 AO 持续多时间尺度的振荡性质相抵触。有关第二点疑问比较容易解释。如果考虑到复杂的基本场结构、球面几何性质及不同正规模态间的非线性相互作用,情况将变得较为复杂与丰富,反而有可能更加容易解释其时间变化特征。实际上,波-流相互作用可以被看作是纬向对称的正规模(纬向波数=0)与其他正规模(纬向波数 ≥ 1)间的非线性相互作用。而有关第一个问题,确实需要加以深入研究。因此,半球尺度且纬向对称的正规模态及其空间结构、稳定性、与其他正规模的相互作用及对外部强迫的响应等问题均为 AO 动力学研究中具有重要意义的课题。

2 理论分析及计算方法概述

为了了解纬向对称的正规模态状况,需要一个纬向对称的二维模式,下面是基于 p -坐标的原始方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{R \partial \varphi} + \omega \frac{\partial u}{\partial p} &= \frac{\tan \varphi}{R} uv + fv + F_\lambda \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{R \partial \varphi} + \omega \frac{\partial v}{\partial p} &= -\frac{\tan \varphi}{R} u^2 - fu - \\ &\quad \frac{g}{R} \frac{\partial z}{\partial \varphi} + F_\varphi \\ \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{R \partial \varphi} + \omega \frac{\partial T}{\partial p} &= \kappa \frac{T}{p} \omega + \frac{Q}{c_p} \\ \frac{1}{R \cos \varphi} \cdot \frac{\partial v \cos \varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial \omega}{\partial p} &= 0 \\ T &= -\frac{pg}{R_d} \frac{\partial z}{\partial p} = 0 \\ p &= \rho R_d T \end{aligned} \quad (1)$$

其中各个符号都具有它们通常的意义,加热场 Q 已近似考虑为具有纬向对称结构。进一步假定 Q 的全部作用只是维持一个纬向对称的温度场并通过准静力平衡关系维持一个纬向对称分布的高度场结

构(有关这一假定的合理性在本节末尾将进一步加以讨论)。若略去摩擦效应,方程组(1)的平衡态为

$$\begin{aligned} \frac{\tan \varphi}{R} u_0^2 + fu_0 &= -\frac{g}{R} \frac{\partial z_0}{\partial \varphi} \\ T_0 &= -\frac{pg}{R_d} \frac{\partial z_0}{\partial p} \\ v_0 &= \omega_0 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

易知它即为地转平衡及静力平衡关系。在此平衡态附近对方程(1)进行线性化,则有

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} u \\ v \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & I_x - bL_1 & 0 \\ -I_y & 0 & L_3 L_2 \\ 0 & eL_1 - d & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ T \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 (u, v, T) 均为扰动量(以下不再申明), L_1, L_2 和 L_3 为如下线性算子

$$\begin{aligned} L_1 &= -\frac{1}{R \cos \varphi} \int_{p_s}^p \frac{\partial(\quad) \cos \varphi}{\partial \varphi} dp \\ L_2 &= -\int_0^p \frac{R_d(\quad)}{gp} dp \\ L_3 &= -\frac{g}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \end{aligned} \quad (4)$$

其他符号的意义分

$$\begin{aligned} b &= \frac{\partial u_0}{\partial p}, d = \frac{1}{R} \frac{\partial T_0}{\partial \varphi}, e = \kappa \frac{T_0}{p} - \frac{\partial T_0}{\partial p} \\ I_x &= \frac{\tan \varphi}{R} u_0 + f - \frac{1}{R} \frac{\partial u_0}{\partial \varphi} \\ I_y &= 2 \frac{\tan \varphi}{R} u_0 + f \end{aligned} \quad (5)$$

本文要寻找的与 AO/NAM 相联系的半球尺度上的正规模态可由线性算子

$$L = \begin{pmatrix} 0 & I_x - bL_1 & 0 \\ -I_y & 0 & L_3 L_2 \\ 0 & eL_1 - d & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

的本征值问题解出。

在实际计算中,模式的平衡态可由 9 a(1994~2002 年)的 ECMWF 资料求纬向平均且取 1, 2 和 12 月冬季平均值获得。由于这样得到的气候态不能严格满足平衡关系式(2),因而会导致虚假的正规模态出现。本文实际上只采用了该资料计算纬向平均的高度场,而相应的纬向风场和温度场则由式(2)计算得到。这样一来能够保证式(2)严格成立,图 1 给出了平衡态的状况。

可以看出,除了高度场以外的其他导出场基本特征与观测较为一致。差分网格点的选取和 ECMWF 资料完全一致,并在水平和垂直方向增加了数

值粘性以抑制网格距尺度上短波的不稳定增长。模式中加入了牛顿冷却项。模式区域分两种类型:有限区域 $20^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ (A); 全球 $90^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{N}$ (B), 分别称为区域 A 和 B。这两种选择的优缺点分别是:对于区域 A 而言,它正好是 AO/NAM 出现的区域,针对性强,且本征值计算中资料处理量较小。其缺点是在 20°N 处有一个人为的侧边界,它的存在也容易导致虚假的正规模态的出现。为了避免这种情形的出现,采用无反射边界条件,即在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 增加了一个波动吸收层。在其中考虑了 Rayleigh 摩擦,而耗散系数由 20°N 处的 $1/(80\text{ d})$ 线性地减小到 40°N 处的 0 值。而对于区域 B 而言,其优点是没有

人为的侧边界,其缺点是它包含了赤道地区,而在该地区由于平均经向风的存在,平衡关系式(2)不是气候态的最佳描述。另一缺点是本征值计算中资料处理量较大。在本研究中本征值的计算直接调用 IMSL Math/Library 中相应的子程序。这些本征值计算程序所返回的本征值及相应的本向量通常按照本征值的复数模的降序来排列。而我们依照其逆序即本征值的复数模的升序来排列,这是因为本征值的复数模越小其对应的正规模的时间尺度就越大,通常其空间尺度也越大。因而能够保证我们在前面的若干个正规模中筛选出与 AO/NEM 相关的正规模。

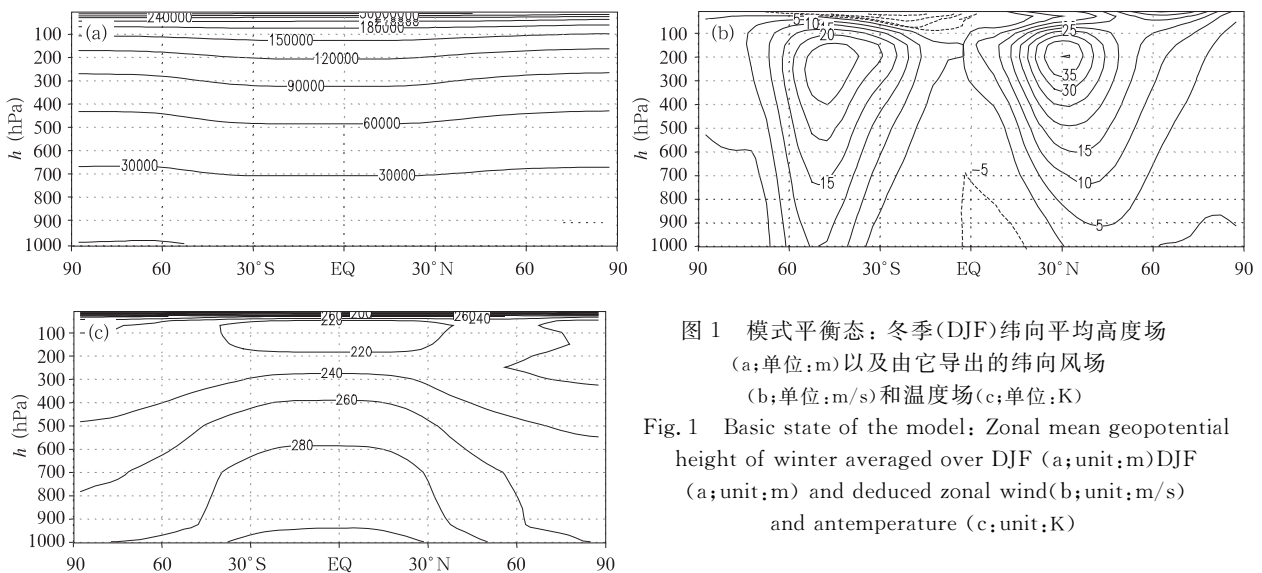


图1 模式平衡态: 冬季(DJF)纬向平均高度场

(a; 单位: m) 以及由它导出的纬向风场

(b; 单位: m/s) 和温度场(c; 单位: K)

Fig. 1 Basic state of the model: Zonal mean geopotential height of winter averaged over DJF (a; unit: m) and deduced zonal wind (b; unit: m/s) and antemperature (c; unit: K)

问题是如何筛选出有实际意义且与 AO/NAM 有关的正规模。正如前面引言中所指出的那样,对像大气这样一个充分发展的非线性不稳定系统,对于其线性部分的正规模的解释需要特别当心。此时的模态选择机制不仅仅是取决于其正规模的非线性不稳定增长率的大小。由于模态间的相互作用,任何不稳定模态都不可能无限制增长。其振幅都最终有一个限度。而其固有频率的信号也由于非线性相互作用被混淆在连续的频谱当中(即所谓混沌态)。而对于线性稳定的正规模由于衰减的原因,其固有频率虽不能对整个系统有所贡献,但在其他不稳定的正规模的强迫作用下,其空间结构仍可以以一种相干结构出现,但其时间变化已不取决于自身的固有周期,而是取决于对其他不稳定正规模的强迫的时间尺度,通常是不规则的混沌运动,可表述为

$$\mathbf{u} = (u \quad v \quad T)^T \quad (7)$$

则三维模式方程可为

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = L\mathbf{u} + N(\mathbf{u}) \quad (8)$$

设线性子 L 及其伴随算子 L^* 的本征值问题的解分别为

$$L\xi_n = \lambda_n \xi_n \quad L^* \xi_n^* = \lambda_n^* \xi_n^* \\ n = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

对于第 n 个正规模,由式(8)和 ξ_n^* 的内积有

$$\frac{d\alpha_n}{dt} = \lambda_n \alpha_n + \langle N(\mathbf{u}), \xi_n^* \rangle \quad (10)$$

这里 $\alpha_n = \langle \mathbf{u}, \xi_n^* \rangle$ 为 \mathbf{u} 在第 n 个正规模上的投影, $\langle N(\mathbf{u}), \xi_n^* \rangle$ 为非线性相互作用在第 n 个正规模上的投影。通常对于像 AO/NAM 这样空间尺度且纬向对称的正规模而言,其相应的时间尺度也非常大,因而 $|\lambda_n|$ 非常小。考虑到这两方面的原因,对于与 AO/

NAM 相关的正规模,其涛动行为主要是来自 $\langle N(\mathbf{u}), \xi_n^* \rangle$,即与其他模态的非线性强迫作用。因此,可以得出以下两点结论:(1) AO/NAM 的空间结构由与之相关的较大时空尺度的正规模决定;(2) AO/NAM 的时间尺度及其变率不取决于这些正规模是否为振荡型及其固有周期的长短而是由模态间的非线性相互作用决定的。因此可以在较大时空尺度的(即前面领先的若干)正规模中找出那些与 AO/NAM 的空间结构较吻合的模态来。可以认为它们就是与 AO/NAM 对应的具有相干结构的物理模态。

如前面所述,在考虑纬向对称正规模时,假定加热场 Q 的作用只是维持一个纬向对称的温度场并通过准静态和准地转平衡关系维持一个纬向对称的基本的高度场和风场结构。这一假定是否忽略了加热在 AO/NAM 形成中的作用?答案是否定的。这是由于首先纬向对称正规模的空间结构取决于加热场所维持的基本场结构,其次我们已经指出与 AO/NAM 相关的纬向对称正规模的时间变化尺度取决于其他非纬向对称正规模的强迫作用,而后者也主要是由热场所维持的基本场的斜压不稳定所激发的。

3 结果与分析

根据上述理论分析及计算方法,分别对模式区域 A 和 B 所对应的线性算子式(6)进行了本征值问题的计算。众所周知,目前有关 AO/NAM 多使用北半球 $20^\circ \sim 90^\circ \text{N}$ 海平面气压(SLP)场变率的第一 EOF 来定义(图 2),其主要特征呈现出沿纬圈近似环状的南北方向的偶极子结构,而它在北大西洋的部分就是北大西洋涛动(NAO)。由 EOF1 的时间系数通过回归方法可给出平均纬向风等该模态的其他要素场结构,其中最引人注目的是平均纬向风的纬度-高度剖面(图 3),它呈现出深厚的正压结构。且 SLP 在极区为低压异常、中低纬度为高压异常时, 45°N 以北为较强的西风异常,并在 45°N 以南伴随着以 35°N 为中心的东风异常。与这些结果相对照,以下分别给出在区域 A 和 B 上的计算结果。在对区域 A 的计算中,发现在领先的纬向对称正规模中有两个与 AO/NAM 空间结构类似的模态。图 4 所显示的是第一个模态。这是一个具有实数本征值和本征向量的不稳定模态,可以看出无论是纬向风还是温度都较好地反映了 AO/NAM 的主要特征。 45°N 南北相反的东西风异常在平流层表现的非常

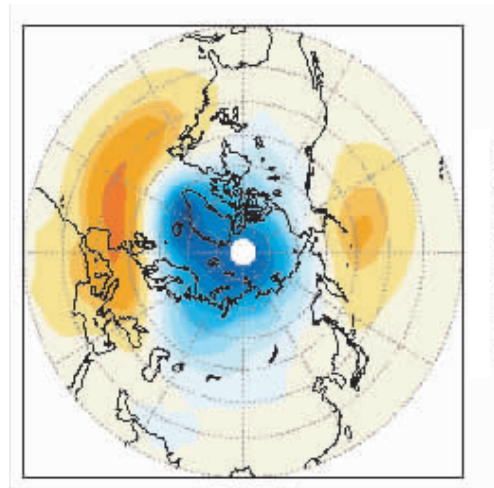


图 2 北半球 $20^\circ \sim 90^\circ \text{N}$ 海平面气压(SLP)场变率的第一 EOF^[4]

Fig. 2 The leading EOF of SLP from $20^\circ \sim 90^\circ \text{N}$ ^[4]

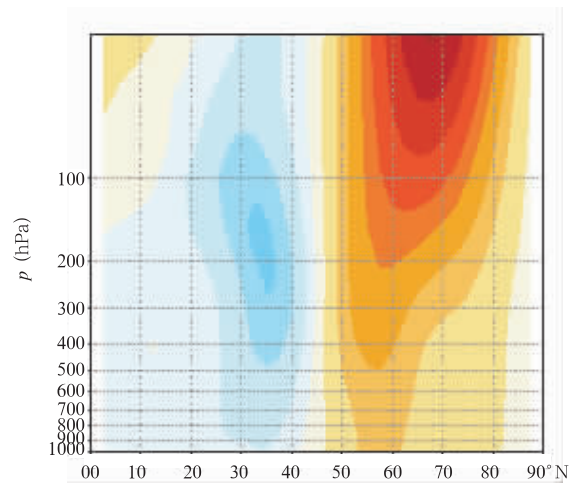


图 3 由 EOF1 的时间系数通过回归方法给出的平均纬向风^[4]

Fig. 3 The regression of zonal mean zonal wind against the EOF1 time series^[4]

明显,在对流层中却不十分明显。这说明 AO/NAM 并非只与一个单一的正规模有关。有关对流层中的情形从第二个模态(图 5)中可以有所反映,这也是一个具有实数本征值和本征向量的不稳定模态。在这个模态中对流层的风场结构得到了较好的反映。为了确保上述结果不是由于 20°N 处的人为边界条件导致的虚假正规模,我们给出区域 B 中的计算结果。同样发现在领先的纬向对称正规模中有两个与 AO/NAM 空间结构类似的模态。且两个都是实的不稳定模态(图 6 和 7)。 $20^\circ \sim 90^\circ \text{N}$ 计算结

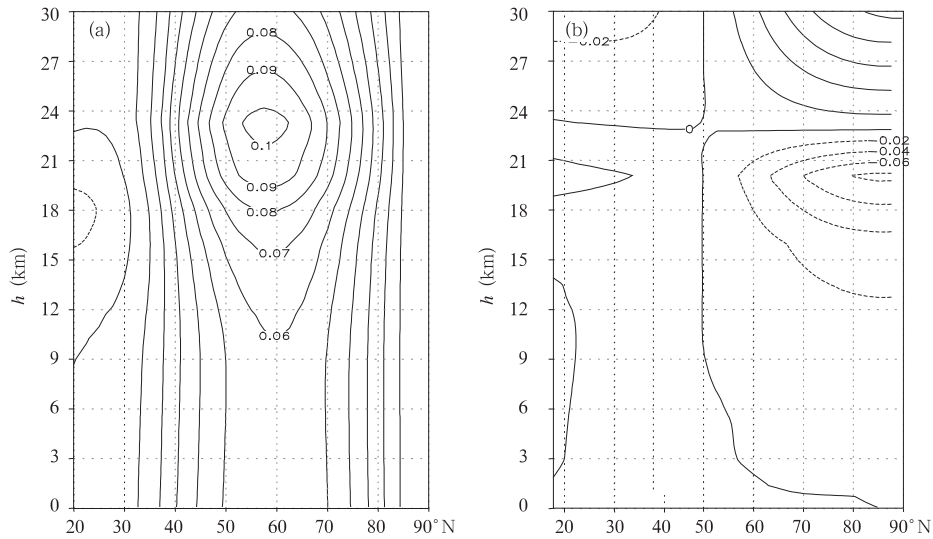


图 4 区域 A 的第一个正规模态(实模态)(a. 纬向风场, b. 温度场)

Fig. 4 Zonal wind (a) and temperature (b) of the first normal mode (real mode) in domain A

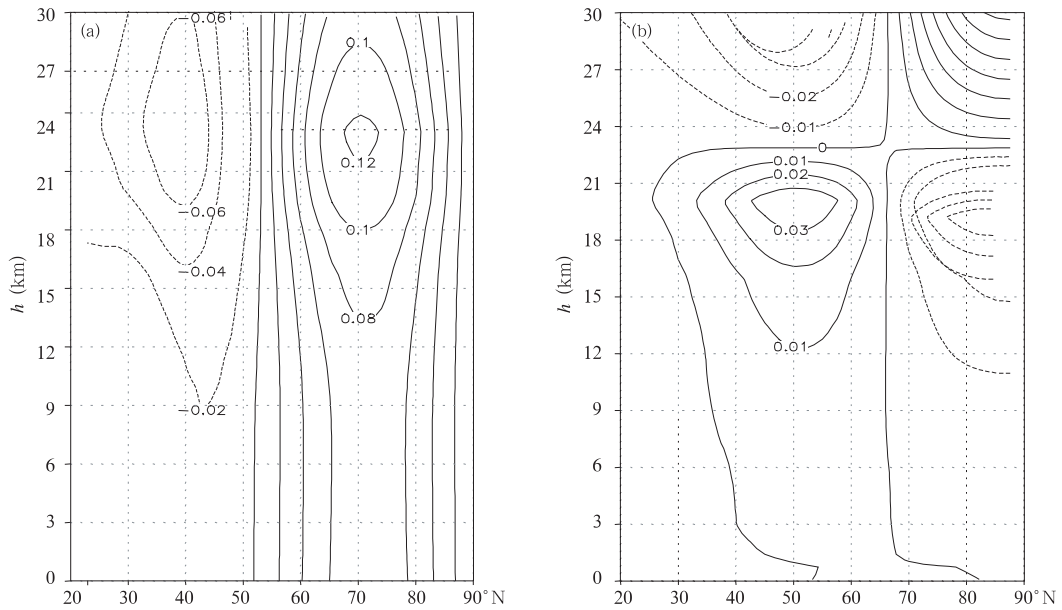


图 5 区域 A 的第二个正规模态(实模态)(a. 纬向风场, b. 温度场)

Fig. 5 Zonal wind (a) and temperature (b) of the second normal mode (real mode) in domain A

果与在 A 区域的结果几乎一致。这从一个方面反映了计算的可靠性。更加有意义的是,与北极涛动或北半球环状模态(AO/NAM)相对应的且更早被人们认识到的南半球环状模态或称南极涛动(AAO)在两个正规模中都得到了很好的反映。这从另一方面证实了计算的正确性。在计算中,发现尽管这些正规模的次序及细微结构都会随参数的变化而发生变化,但是总可以在其中找到具有上述基

本特征的正规模,从这个意义上说,计算具有较好的鲁棒性。

总之,通过这些与 AO/NAM/AAO 相关的正规模的发现,我们有理由认为若干个具有半球尺度的纬向对称的正规模态所对应的空间相干结构在北半球变率的 EOF1 所代表的 AO/NAM 的形成中扮演着重要角色。AO/NAM 很可能就是在模态间非线性相互作用下这些正规模涛动行为的反映。

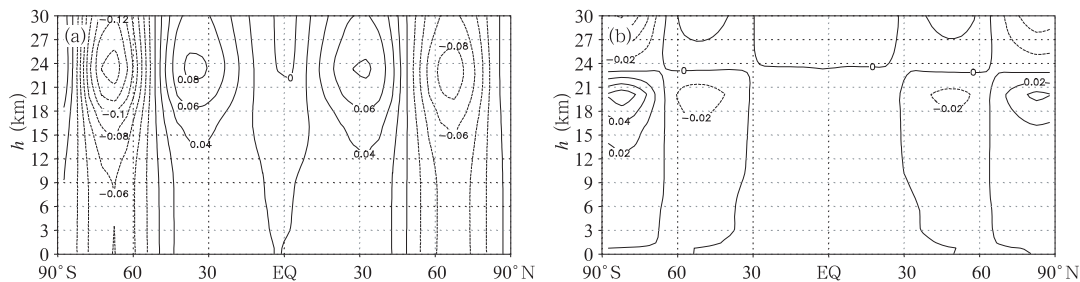


图 6 区域 B 的第一个正规模态(实模态)(a. 纬向风场, b. 温度场)

Fig. 6 Zonal wind (a) and temperature (b) of the first normal mode (real mode) in domain B

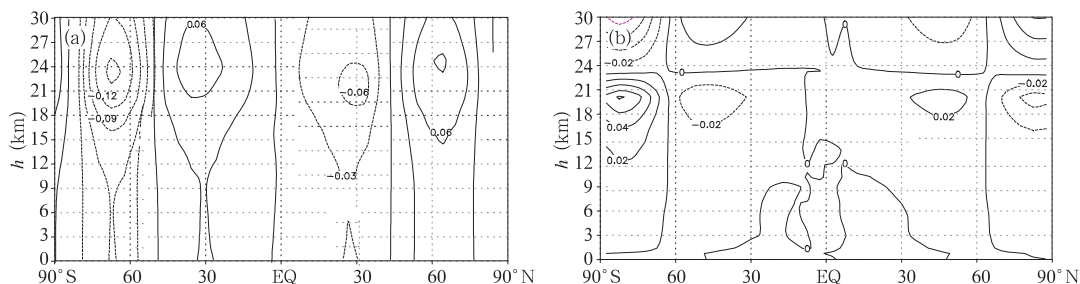


图 7 区域 B 的第二个正规模态(实模态)(a. 纬向风场, b. 温度场)

Fig. 7 Zonal wind (a) and temperature (b) of the second normal mode (real mode) in domain B

4 讨论

通过以上工作,使我们对于纬向对称的正规模态在理解 AO/NAM 当中的作用有了一个初步的认识。但是有许多问题仍然不是十分清楚。如 EOF1 可以解释为在众多的统计样本中出现的概率最大的一种空间型。但是我们提炼出的两个正规模态,尽管可以认为是一种具有空间相干性的物理模态,但尚不清楚是否是一种占优模态,且是何种意义下的占优模态? 这个问题直接关系到其重要程度。另外,这些纬向对称的正规模态是否可以归为某种气象上已知的波动。目前看来答案似乎是否定的。因为在这里两种因素是重要的且与经典的波动相比较是不同的。第一是具有复杂结构的真实的气候基本场,第二是南北方向行星尺度的球面几何性质。它们与动力学过程一起决定了正规模态的结构。而这两种因素在经典的地球流体波动中无法解析地予以考虑。因而有关的正规模态是一种全新的模态,不能简单地说明其波动的性质。

参考文献

[1] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation sig-

nature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett*, 1998, **25**:1297-1300

- [2] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J Climate*, 2000, **13**: 1000-1016
- [3] Thompson D W, Lee S, Baldwin M P. Atmospheric processes governing the northern hemisphere annular mode/north atlantic oscillation. In: Hurrell J W, Kushnir Y, Visbeck M, et al. Eds. *The AGU Monograph on the NAO*. 2002
- [4] Wallace J M. On the Arctic and Antarctic Oscillations, Lecture by J M Wallace from the 2000 NCAR ASP Summer Colloquium on the Dynamics of Decadal to Centennial Climate Variability. 2000
- [5] DeWeaver E, Nigam S. Do stationary waves drive the zonal-mean jet anomalies of the northern winter? *J Climate*, 2000, **13**: 2160-2176
- [6] Eichelberge S, Holton J R. A mechanistic model of the northern annular mode. *J Geophys Res*, 2002, **107**: 4388
- [7] Lorenz D J, Hartmann D L. Eddy-zonal flow feedback in the Southern Hemisphere. *J Atmos Sci*, 2000, **58**:3312-3327
- [8] Lorenz D J, Hartmann D L. Eddy-zonal flow feedback in the Northern Hemisphere winter. *J Climate*, 2003, **16**(8):1212-1227

ZONALLY SYMMETRIC NORMAL MODES ASSOCIATED WITH THE AO/NAM

Zhao Nan

(State Key Laboratory for Disastrous Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Masaaki Takahashi

(Center for Climate System Research, University of Tokyo)

Abstract

The Arctic Oscillation (AO) or the Northern Hemisphere Annular Mode (NAM), which is one of the important modes of climate variability, is usually represented by the leading EOF of Northern Hemisphere variability. However, this is not sufficient for an understanding of its dynamics, because EOF has only a statistical meaning and does not indicate whether it is really a physical mode or not. On the other hand, the theory of zonal mean flow-eddy interaction merely gives the zonal mean structure of the zonal wind, and does not guarantee a zonal coherence to the variation of the zonal wind along a certain latitude. Therefore, it does not imply a physical mode with a zonally symmetric structure can be organized throughout the hemisphere. So, fundamental issues of the mechanism of the AO are still not well understood. In this paper, zonally symmetric or annular normal modes, which have the most direct linkage to linear dynamics around the basic state of the atmosphere and interact with other modes due to nonlinear dynamics, are regarded to play a key role in our understanding of the AO/NAM. In order to investigate the dynamical nature of the AO/NAM associated with these normal modes, this work is devoted to a numerical study on the zonally symmetric normal modes of the linear dynamics about the basic climate state of Northern Hemisphere winter. By use of a linearized p -and spherical coordinate primitive equation, zonally symmetric normal modes with spatial structures resembling that of the AO/NAM are found, which demonstrates that the AO/NAM could be a reflection of the dynamical behavior of zonally symmetric normal modes at hemispheric scale.

Key words: Arctic Oscillation (AO), Northern Hemisphere Annular Mode (NAM), Zonally symmetric normal modes, Climate variability.