

关于北半球准定常行星波年际变化的 资料分析和数值模拟

杨 蕾 陈 文 黄荣辉

中国科学院大气物理研究所, 北京 100080

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料和大气环流模式(CCSR/NIES AGCM Ver. 5. 6), 对北半球冬季准定常行星波活动的年际变化进行了分析和模拟。基于以前对 EP 通量散度的遥相关分析, 作者将 EP 通量散度的 EOF 第一分量时间序列 T1 定义为年际变化指数。对应于 T1 的高指数, 在对流层和平流层低层, 准定常行星波更多地折向赤道传播, 从而在对流层出现一个 EP 通量散度的偶极子型异常, 这一形势主要来自 2 波和 3 波的贡献; 而折向高纬度经极地波导上传播的行星波活动减弱了, 在高纬度产生异常辐散, 这一形势主要来自 1 波和 2 波的贡献。相关和回归分析发现, 准定常行星波的年际变化与北极涛动有密切联系, 与 T1 对应的纬向平均流场以及位势高度场的异常分布都与北极涛动下的异常形势非常相似。利用大气环流模式模拟的结果显示, 模式在对流层可以很好地模拟准定常行星波的年际变化以及北极涛动形势, 并且二者同样密切相关。但是模式还不能很好地模拟行星波经极地波导向平流层传播的年际变化, 对可能的成因也进行了探讨。

关键词 准定常行星波 年际变化 北极涛动

文章编号 1006-9895(2005)05-0682-15

中图分类号 P433

文献标识码 A

The Data Analysis and Simulation of the Interannual Variation of Quasi-Stationary Planetary Wave in the Northern Hemisphere

YANG Lei, CHEN Wen, and HUANG Rong-Hui

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract Recent study indicates that the stratospheric and tropospheric circulations are not isolated, and are dynamically linked in fact. There is evidence that the troposphere-stratosphere coupling interaction is closely associated with the quasi-stationary planetary wave activity. However, the study of the variation of quasi-stationary planetary wave activity is absent now. The interannual variation of quasi-stationary planetary wave in the Northern Hemisphere winter is analyzed by using NCEP/NCAR reanalysis data and simulated with the CCSR/NIES AGCM Ver. 5. 6. Based on the former study, time series of the first EOF component of EP flux divergence (T1) is defined as the interannual variation index. Data reanalysis result shows that the planetary wave propagates more equatorward in the troposphere and lower stratosphere with the positive T1, thus, there is a dipole of anomalous EP flux divergence in the midlatitudes of the troposphere. While the upward and poleward wave refraction into the polar waveguide is reduced with the positive T1, and there is anomalous divergence in high latitudes. It suggests interaction between meridional propagation and upward propagation through the polar wave guide of quasi-stationary planetary wave. Detailed analysis shows that the dipole pattern of EP flux divergence anomalies in mid-latitude troposphere comes basically from wavenumber 3, and wavenumber 2 mainly contributes to positive anomalies of the dipole pattern.

收稿日期 2004-08-02, 2004-12-15 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40231005、40375021, 中国科学院创新项目 KZCX3-SW-218

作者简介 杨蕾, 女, 1979 年出生, 硕士, 研究方向: 气候动力学。E-mail: yanglei@cma.gov.cn

Compared with wavenumber 2 and wavenumber 3, wavenumber 1 almost does not impact the pattern in the troposphere. However, the anomalous EP flux divergence through polar wave guide in high latitudes is mainly attributed to wavenumber 1 and wavenumber 2. Especially in stratosphere, wavenumber 1 and wavenumber 2 have similar contribution to the anomalous EP flux divergence, and display positive correlation with T1. However, the anomalous propagation of wavenumber 1 and wavenumber 2 displays different correlation with T1. With the positive T1, wavenumber 1 propagates more poleward and its upward propagation is obviously reduced, while wavenumber 2 more propagates to middle and low latitudes. The regression and correlation analysis shows that the anomalies of zonal mean zonal wind display an equivalent barotropic dipole pattern, which extends from the troposphere to the stratosphere, and the zonal mean temperature anomalies pattern also displays similar structure. The regression of geopotential height on T1 displays the south-north oscillation between the arctic region and middle latitudes. All these anomalies patterns with T1 resemble to the Arctic Oscillation (AO) anomalies, especially the correlation coefficient of T1 and winter AO index is 0.87, which is by far exceeding the 99% significance level. The results suggest that the interannual variation of quasi-stationary planetary wave is closely associated with the Arctic Oscillation. Simulation by AGCM shows that the interannual variation of quasi-stationary planetary wave, the corresponding patterns of zonal mean zonal wind, zonal mean temperature and geopotential heights, and the Arctic Oscillation in the Northern winter are all well simulated by the AGCM in the troposphere. Simulation result also shows that there is close correlation between the interannual variation of quasi-stationary planetary wave and the Arctic Oscillation in the troposphere. But in the stratosphere the simulation is not successful, and there is an obvious discrepancy between the reanalysis and the model.

Key words quasi-stationary planetary wave, interannual variation, Arctic Oscillation(AO)

1 引言

已有研究发现,平流层大气运动与对流层大气运动不是孤立的,而是相互作用、相互影响的,不仅对流层的变化会上传影响平流层,平流层的变化也可能改变对流层的大气环流状况。尤其在冬季,平流层与对流层会有很强的耦合作用,平流层的扰动会向下传播,并使得对流层大气产生异常,许多极端天气事件都与其有关,人们开始越来越多地注意到这种耦合作用^[1~3]。

Thompson 和 Wallace^[4, 5]所做的工作对于这一方向的研究有着推动性的作用。他们描述了一个北半球冬季海平面气压变化的环状模态,这一模态与对流层和平流层低层有很强的耦合,被称为北极涛动(Arctic Oscillation, 简称 AO)。北极涛动反映了纬向对称的变化,具有指数循环的特点。与北极涛动相关的一些研究表明,平流层的异常在一定条件下会向下传播影响对流层,关于这一作用的机制目前并没有一个成熟的理论。Dunkerton^[6], Christiansen^[7]和 Zhou 等^[8]给出了一种间接机制,指出平流层并非直接影响对流层环流,而是通过影响上传行星波的折射影响对流层,是对对流层变化的一种反馈。而另有学者^[9~11]则提出一种直接的机制,

即平流层的行星波被向下反射,到达对流层并对那里的环流产生影响。可以看到,不管是间接机制还是直接机制,对流层—平流层系统的这种耦合作用都是与准定常行星波的变化相联系的,然而,目前直接对准定常行星波活动的变化进行分析是比较少见的。

有关北半球冬季准定常行星波传播的年际变化,陈文和黄荣辉^[12~14]曾比较系统地研究了热带纬向风准两年振荡(Quasi-Biennial Oscillation, 简称 QBO)对准定常行星波传播的影响,并探讨了其对臭氧运输的作用。他们的研究表明,QBO 的影响基本局限于平流层,后来,陈文等^[15]的资料诊断分析也证实了这一点。最近,Chen 等^[16]通过对北半球准定常行星波 EP 通量散度场的遥相关形势进行研究,定义了一个对流层振荡指数(Tropospheric Interannual Oscillation, 简称 TIO),指出通过极地波导穿过对流层顶的行星波向上和向极地的折射与 TIO 有紧密的联系;回归和相关分析还显示,TIO 与北半球环状模态(Northern Annular Mode, 简称 NAM)也是密切相关的。本文将从另一个角度定义对流层行星波的年际变化指数,进行进一步的分析,并与模式模拟结果进行对比。

2 资料及分析方法

本文资料分析部分所用的是 NCEP/NCAR 全球再分析资料^[17]。由于在 1958 年以前, 100 hPa 以上的高层缺乏足够的观测, 因而 1958 年以前的平流层再分析资料并不可靠^[18], 所以本文利用的是 NCEP/NCAR 从 1958/1959~1997/1998 年共 40 年的月平均等压面网格资料。垂直方向从 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 层, 水平网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 包含四个要素: 风的纬向分量 u (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、经向分量 v (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、温度 T (单位: $^{\circ}\text{C}$)、位势高度 H (单位: 位势米)。

数值模拟部分使用的是日本东京大学气候系统研究中心和日本国立环境研究所发展的全球大气环流模式 (CCSR/NIES AGCM, Ver. 5. 6)。模式在水平方向采用三角截断到 42 波, 垂直为 21 层 (T42L21)。模式上边界为 1 hPa, 在与 NCEP 再分析资料对比时本文只取到了 10 hPa。关于模式的详细介绍参见文献^[19]。在这一部分中, 我们利用实际海表面温度作为初始强迫场, 从静止等温状态开始积分 42 年, 取后 41 年结果用于分析。

由于夏季准定常行星波被限制在对流层, 对耦合作用的影响较小, 因此, 本文仅对冬季准定常行星波的年际变化进行分析, 冬季平均场由 12 月、1 月、2 月平均得到。这里, 我们主要应用 EOF 方法进行分析, 分析中考虑到面积的影响, 以 $\cos\varphi$ 的平方根为权重对格点数据进行了加权, 其中 φ 为纬度; 特征值和特征向量由相关系数矩阵计算得到。

3 NCAR/NCEP 再分析资料的分析

3.1 准定常行星波活动的年际变化

对北半球冬季准定常行星波 EP 通量散度场做经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, 简称 EOF) 分析, 第一分量所解释方差量为总方差的 15.08%, 并且经 North 等^[20]提出的判据检验与其余特征值很好的分离开来。第一分量的时间序列 (如图 1a 所示) 一方面呈现出明显的年际变化特征, 另一方面还具有趋向于正值的线性趋势, 这一线性趋势通过了 95% 的信度检验。在 Chen 等^[16]的研究工作中, 利用遥相关分析, 以 500 hPa、 50°N 和 300 hPa、 40°N 作为两个参考点, 把两点之间的 EP 通量散度差值定义为行星波对流层年际振荡指数 (TIO, 图 1b)。比较发现, 这两个时间序列的变化趋势是非

常相似的, 其线性相关系数达到了 0.75, 这也说明 EOF 分析得到的 EP 通量散度的第一分量具有实际的物理意义, 并且由其解释的方差量可以知道, 这是北半球冬季准定常行星波演变中最为主要的变化模态。这里考虑到进一步的模式模拟分析中, 使用遥相关方法可能会由于参考点选择的不同而产生差异, 因此, 本文用 EP 通量散度 EOF 第一分量的时间序列 (为了便于后面的引用, 简称为 T1) 来描述北半球准定常行星波的年际变化。图 1c 是 EP 通量散度 EOF 第一分量, 整个分布呈现出一种比较复杂的南北振荡, 由对流层一直延伸到平流层, 这一分布形势与 Chen 等^[16]所得到的对流层遥相关型非常相似。为了更清楚地阐述这种变化形势, 下面将对各波数行星波 EP 通量以及散度进行回归分析。

图 2a 是 1~3 波合成的 EP 通量和散度对 T1 的回归, 可以看到 EP 通量散度异常在中纬度对流层呈现一个偶极子形势, 这一形势与对流层行星波的异常经向传播相联系。在高纬度, 异常的辐散沿着极地波导从对流层一直延伸到平流层, 此外, 向上传播的行星波在大约 $35^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 减弱, 而在 $60^{\circ}\text{N} \sim 70^{\circ}\text{N}$ 附近略有增加。上述形势表明, 与 T1 的高指数态相对应, 在对流层, 行星波动更加倾向于向中低纬度传播, 向上和向极地折射经极地波导进入平流层的行星波活动则被削弱了; T1 的低指数态下则恰好相反, 并且上述形势与 T1 的相关都通过了 99% 的统计信度检验。根据上述分析可以推断, 经极地波导穿过对流层顶向上传播进入平流层的行星波活动与对流层折向中低纬度传播的行星波活动并不是孤立的, 两支波导之间有着密切的相互关系。当 T1 为高指数时, 对流层准定常行星波向赤道方向的传播增强, 而通过极地波导向上的传播则削弱了。在图 1a 中, T1 指数具有明显的上升趋势, 这也表明, 近几十年来, 准定常行星波向着中低纬度的传播增加了, 而折向高纬度, 通过极地波导进入平流层的行星波活动被削弱了, 这一点与 Rind 等^[21]的温室气体加倍模式模拟得到的结论是一致的。

对各波数进行具体分析发现, 行星波 EP 通量散度异常在中纬度对流层的偶极子形式主要来自于 3 波的贡献。3 波 (图 2d) 活动主要限制在对流层, 高指数时, 3 波更多地从中纬度向赤道对流层上层传播, 向高纬度的传播减弱, 从而导致了大约 40°N 附近的异常辐合和大约 55°N 的异常辐散, 这一异常

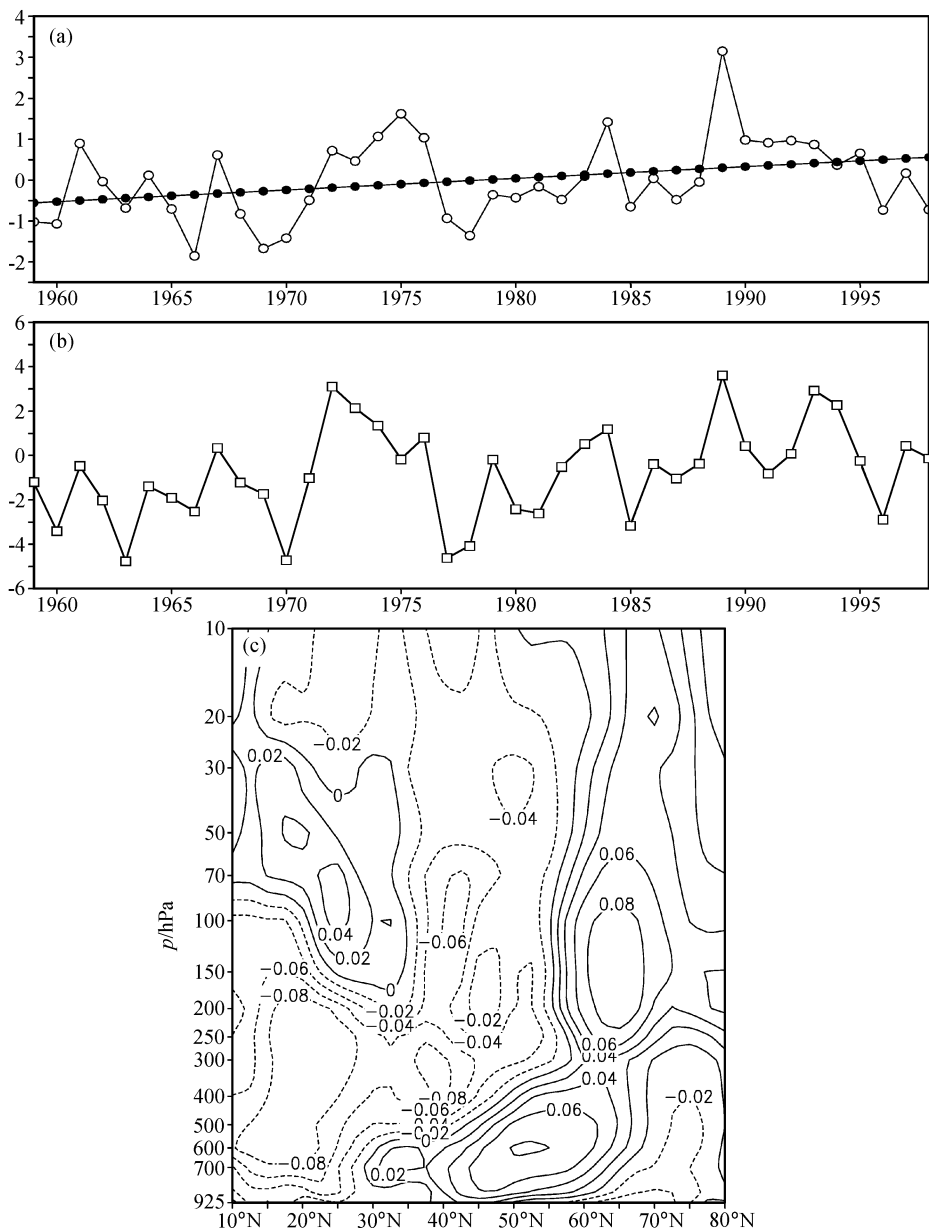


图 1 (a) EP 通量散度 EOF 第一分量时间序列(T1, 标准化)及其线性趋势; (b) 对流层年际振荡(TIO)指数^[16](单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); (c) EP 通量散度 EOF 第一分量

Fig. 1 (a) Time series of the first EOF component of EP flux divergence (T1, normalized) together with the linear trend; (b) troposphere interannual oscillation index^[16](units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); (c) the first EOF component of EP flux divergence

达到了 99% 的信度。就 2 波形势来看(图 2c), 在对流层低层, 2 波向上的传播在大约 $35^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 减弱, 而在 $60^{\circ}\text{N} \sim 70^{\circ}\text{N}$ 附近则有所增强。这一传播异常导致了 2 波在中纬度对流层的异常辐散, 这表明 2 波对于图 2a 中偶极子形势的正异常也有着重要贡献。相对于 2 波、3 波而言, 1 波(图 2b)对于对流层的偶极子形势几乎没有贡献。图 2a 中沿极地波导的异常辐散形势则主要来自 1 波和 2 波(图

2b 和 c)。在相关较大的 100 hPa 附近, 1 波和 2 波对散度异常的贡献是相似的, 表现出与 T1 指数的正相关。然而, 1 波和 2 波 EP 通量的异常传播与 T1 的关系却并不相同。T1 高指数态下, 1 波在 60°N 以北的极区平流层, 其向上的传播明显减弱, 同时在平流层中上层波还趋于向极地传播, 而 2 波在平流层中上层则更加趋于向赤道方向传播。上述分析表示, 在平流层下层, 1 波和 2 波的异常传播

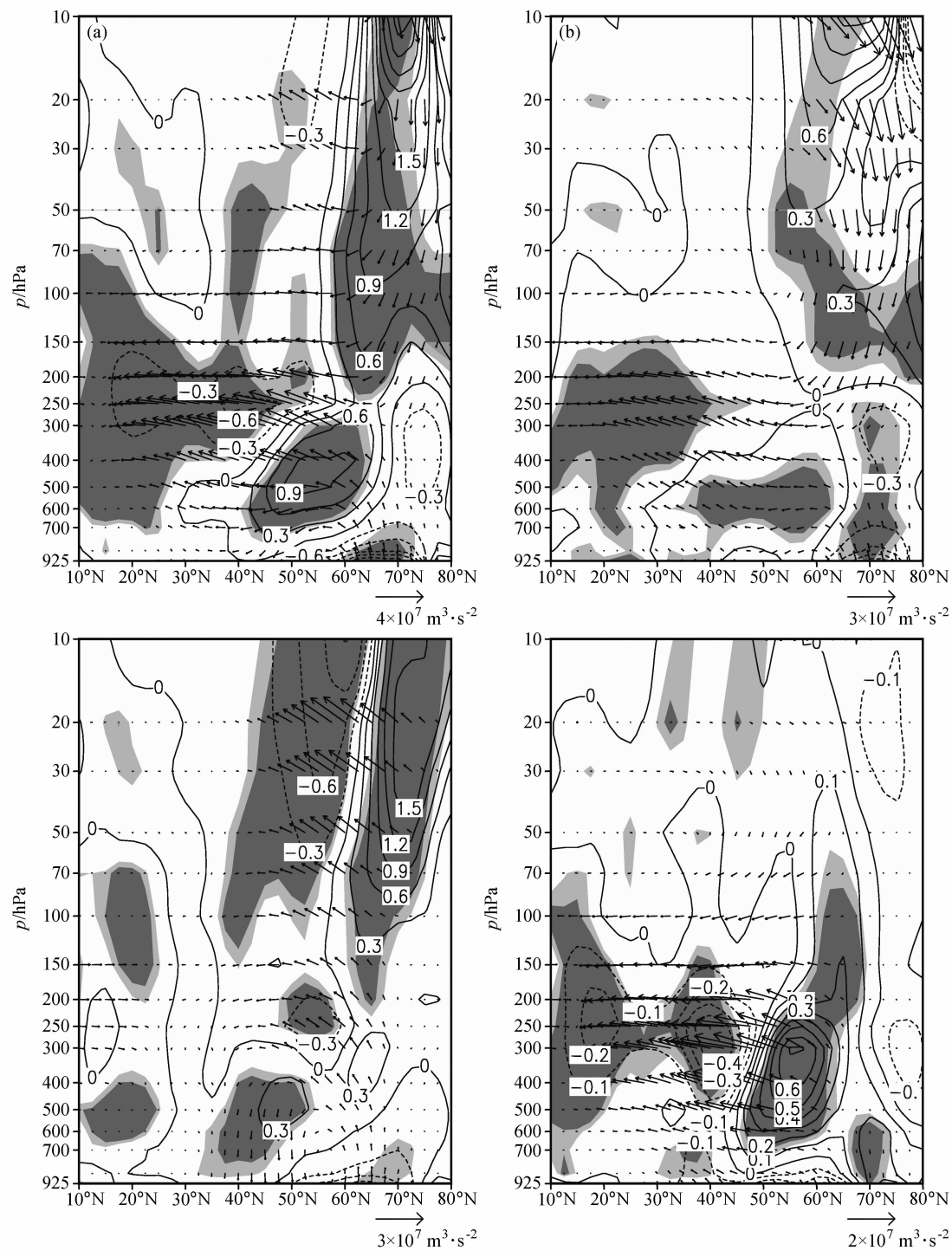


图2 行星波 EP 通量(矢量图)及其散度(等值线, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)对 T1 的回归, 深、浅阴影区分别表示 EP 通量散度与 T1 的相关通过了 99% 和 95% 的统计检验信度: (a) 1~3 波合成; (b) 1 波; (c) 2 波; (d) 3 波

Fig. 2 Regression maps for the planetary wave EP flux (vector) and its divergence (contour, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) on T1 index: (a) The sum of zonal wavenumbers 1 to 3; (b) wavenumber 1; (c) wavenumber 2; (d) wavenumber 3. The dark and light shadings indicate the correlation is significant above 99% and 95% level, respectively

是与行星波总的 EP 通量的异常辐散相联系的, 但在平流层中层, 1 波和 2 波的异常传播是相反的, 趋于导致相反的散度异常。由此推测, 很可能这一区域还存在重要的波-波相互作用。

3.2 与北极涛动(AO)的关系

图 3a 是纬向平均的纬向风对 T1 的回归和相关分布。纬向风的异常是一个相当正压的偶极子,从对流层低层一直延伸到平流层,大约 35°N 和 55°N 纬度带的西风呈现“跷跷板”形势,高纬度西风环流的中心随高度向北倾斜,进入平流层以后逐渐北移到 65°N 附近。上述形势通过了 99% 的统计信度检验。即在 T1 的高指数态下,大约 35°N 附近的纬向西风减弱,而 55°N 附近的西风增强;低指数态下则恰好相反。这一纬向风的异常形势与纬向平均风 EOF 第一分量的分布(图 3c)以及其他研究中纬向平均风对 AO 指数回归的结果^[5, 23]是非常相似的。图 3b 是纬向平均温度场对 T1 的回归,可以看到仍然是一个南北振荡的形势,并且在对流层和平流层低层通过了 99% 的信度检验,即 T1 高指数态时,低纬度对流层顶附近和中纬度对流层的温度升高,而高纬度对流层和平流层下层的温度降低。这一温度形势与纬向风场的异常以及准定常行星波传播的异常是一致的:当 T1 为高指数时,行星波向高纬度的传播减少,极涡受到的扰动较小,强大而稳定,因此极地附近的温度偏低;反之当 T1 为低指数时,行星波更多地向高纬度传播,极涡受到扰动较大,被削弱,于是

极地附近温度偏高。

图 4a~c 分别是 1000 hPa、500 hPa 以及 50 hPa 位势高度场对 T1 的回归和相关分布。很明显,这一形势与 Thompson 和 Wallace^[4]对海平面气压场作 EOF 分析得到的 AO 形势以及 500 hPa、50 hPa 位势高度场对 AO 指数的回归形势是非常相似的。地面位势高度异常表现为一个极区与中纬度带的“跷跷板”形势,很像是极涡的一个地面信号。对应于 T1 的高指数,极区位势高度降低而中纬度位势高度增加。50 hPa 位势高度异常场则主要反映了极涡强度的变化,T1 高指数时,极涡强大而稳定,这与前面的分析是一致的。500 hPa 位势高度异常仍然表现为一个南北振荡的形势,对应于 T1 高指数,北极地区位势高度降低,中纬度海区位势高度增加。但相比近乎纬向对称的地面和 50 hPa 形势而言,500 hPa 位势高度异常更倾向于一种波状形势。上述形势在活动中心都通过了 99% 的信度检验。我们利用 Thompson^[22]给出的从 1958/1959 年到 1997/1998 年共 40 年的月平均 AO 指数构造了 40 年的冬季 AO 指数,如图 4d 所示。与 T1 进行比较发现,冬季 AO 指数与 T1 变化形势非常相似,相关系数达到 0.84,远远超过了 99% 的统计检验信度。根据上述分析,可以推断准定常行星波的这种年际变化与北极涛动有着密切的相互联系。

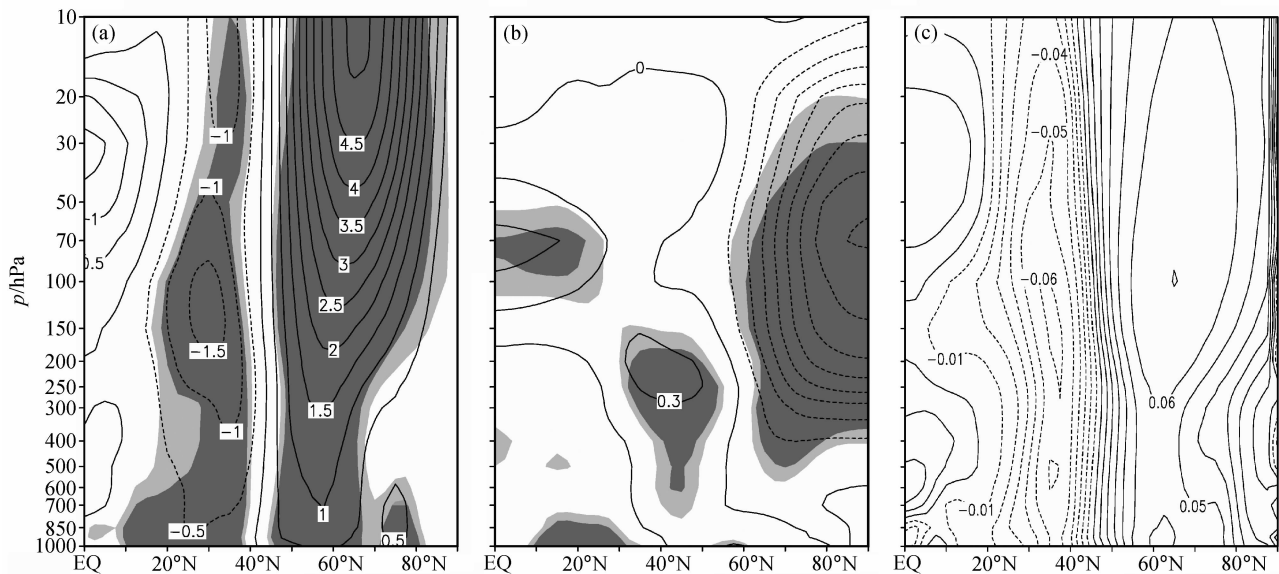


图 3 (a) 纬向平均风对 T1 的回归(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 纬向平均温度场对 T1 的回归(单位: K); (c) 纬向平均风的 EOF 第一分量(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。深、浅阴影表示与 T1 的相关通过了 99%、95% 的统计信度检验

Fig. 3 (a) The zonal-mean zonal winds regressed on T1 index (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) the zonal-mean temperature regressed on T1 index (units: K); (c) the first EOF component of zonal-mean zonal winds (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). The dark and light shadings indicate the correlation is significant above 99% and 95% level, respectively

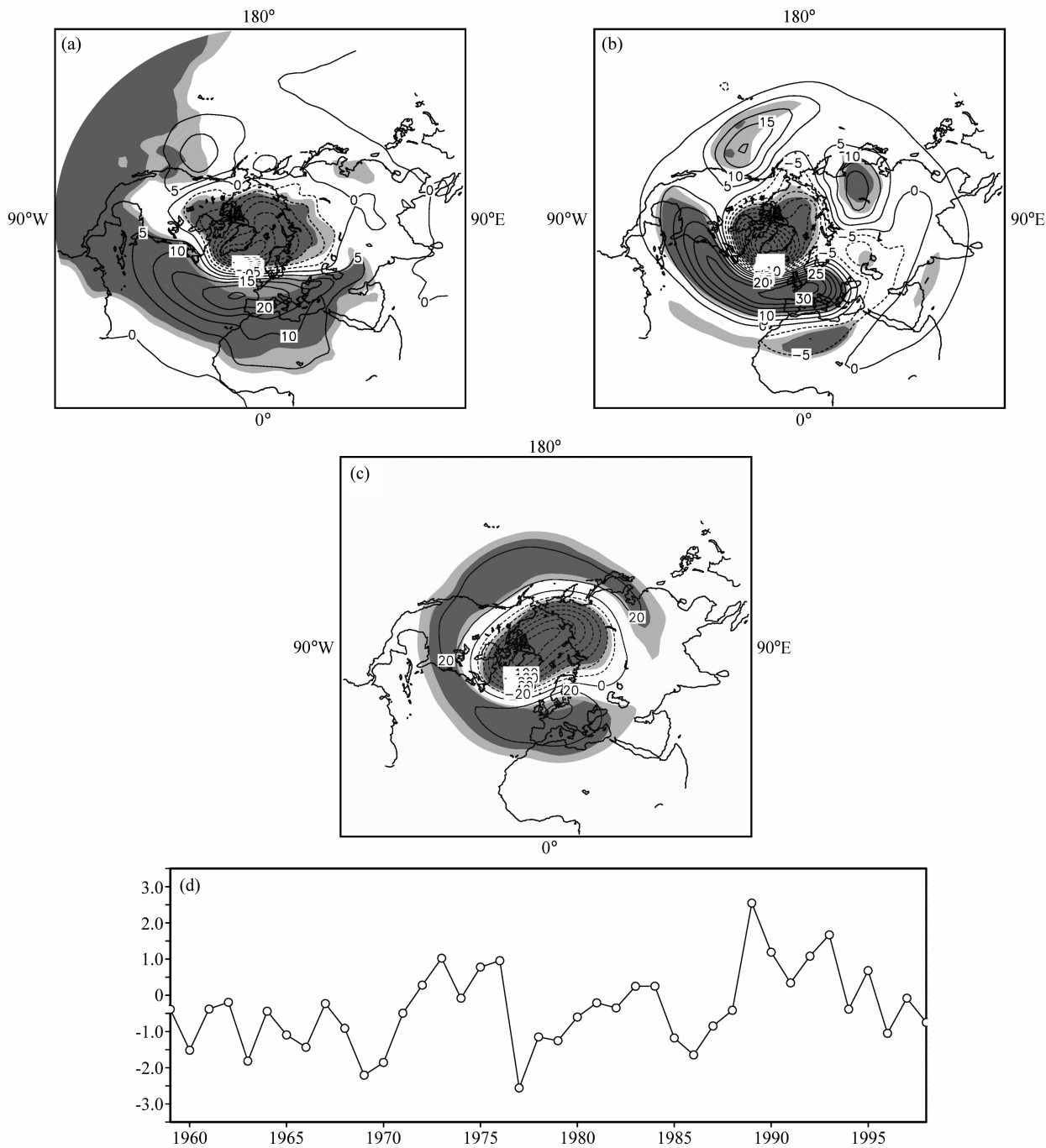


图 4 (a、b、c) 位势高度场对 T1 的回归 (单位: gpm): (a) 1000 hPa, (b) 500 hPa, (c) 50 hPa; (d) 1959~1998 的冬季 AO 指数。深、浅阴影表示与 T1 的相关通过了 99%、95% 的统计信度检验

Fig. 4 (a, b, c) The geopotential heights (units: gpm) at 1000 hPa (a), 500 hPa (b) and 50 hPa (c) regressed on T1 index; (d) the winter AO index (1959–1998). The dark and light shadings indicate the correlation is significant above 99% and 95% level, respectively

4 AGCM 模拟结果及对比分析

4.1 准定常行星波活动的年际变化

首先, 对 EP 通量的散度场作 EOF 分析, 第一

分量所解释的方差量占总方差的 15.60%, 与再分析资料结果大致相当, 其时间序列的分布如图 5a 所示。可以看到, 模式模拟的准定常行星波活动也表现出年际的振荡, 但是并没有显著的线性趋势变

化。模拟的 T1 指数与再分析资料的 T1 指数相关仅为 0.3, 这表明模拟的行星波振荡与实际还是有着相当的差别。从 EOF 的第一分量的分布(图 5b)与 NCEP 再分析资料的结果比较, 可以看到在对流层中下层模式模拟与再分析结果是相似的分布, 然而在对流层上层到平流层, 模式模拟与再分析结果则有所不同, 沿极地波导的异常辐散区在图 5b 中几乎看不到。

将模拟的准定常行星波 EP 通量及其散度场对 T1 作回归(图 6), 与图 2 比较可以发现, 在对流层, 模式很好地模拟了准定常行星波传播的异常和 EP 通量散度异常形势。1~3 波合成的结果(图 6a)显示, EP 通量散度异常在中纬度对流层存在一个偶极子型, 这一形势与行星波的异常经向传播相联

系, 即 T1 高指数态下, 准定常行星波更多地向着中低纬度传播, 而向高纬度的传播削弱了。但是, 在平流层则没有与此相联系的任何显著的行星波传播的异常。具体到各波数的分析发现, 3 波对于对流层 EP 通量异常偶极子型的贡献是最为主要的。3 波活动(图 6d)主要限制在对流层, 对应于 T1 的高指数态, 3 波从中纬度向热带对流层上层的传播明显增大, 而向高纬度的传播减小, 由此导致了大约 35°N 附近的异常辐合和大约 50°N 附近的异常辐散。2 波(图 6c)在对流层低层向上传播在 T1 高指数时明显减弱, 从而导致了中纬度的异常辐散形势, 这表明 2 波对于对流层异常也有重要贡献。比较而言, 1 波对对流层散度异常的偶极子型影响很小。上述对流层形势都通过了 99% 的统计信度检

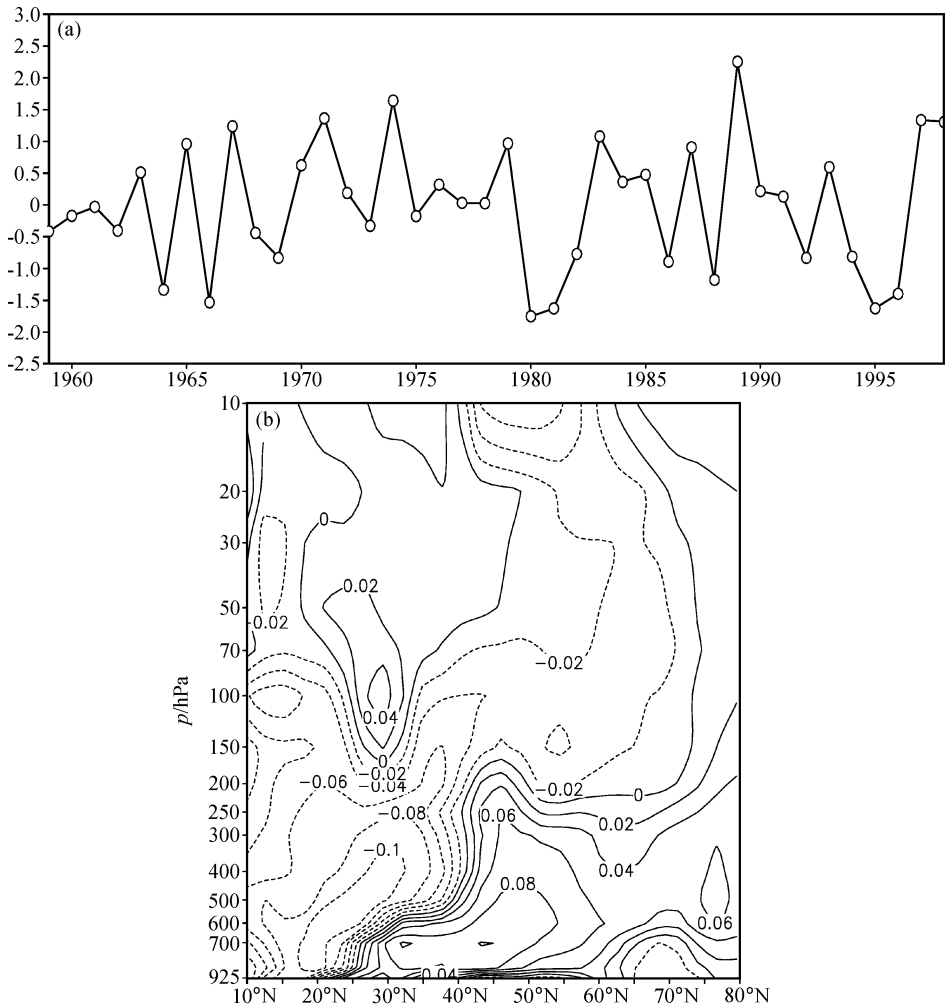


图 5 模式模拟的准定常行星波 EP 通量散度: (a) EOF 第一分量时间序列(标准化); (b) EOF 第一分量
Fig. 5 Simulated EP flux divergence for quasi-stationary planetary wave; (a) Time series of the first EOF component (normalized); (b) the first EOF component

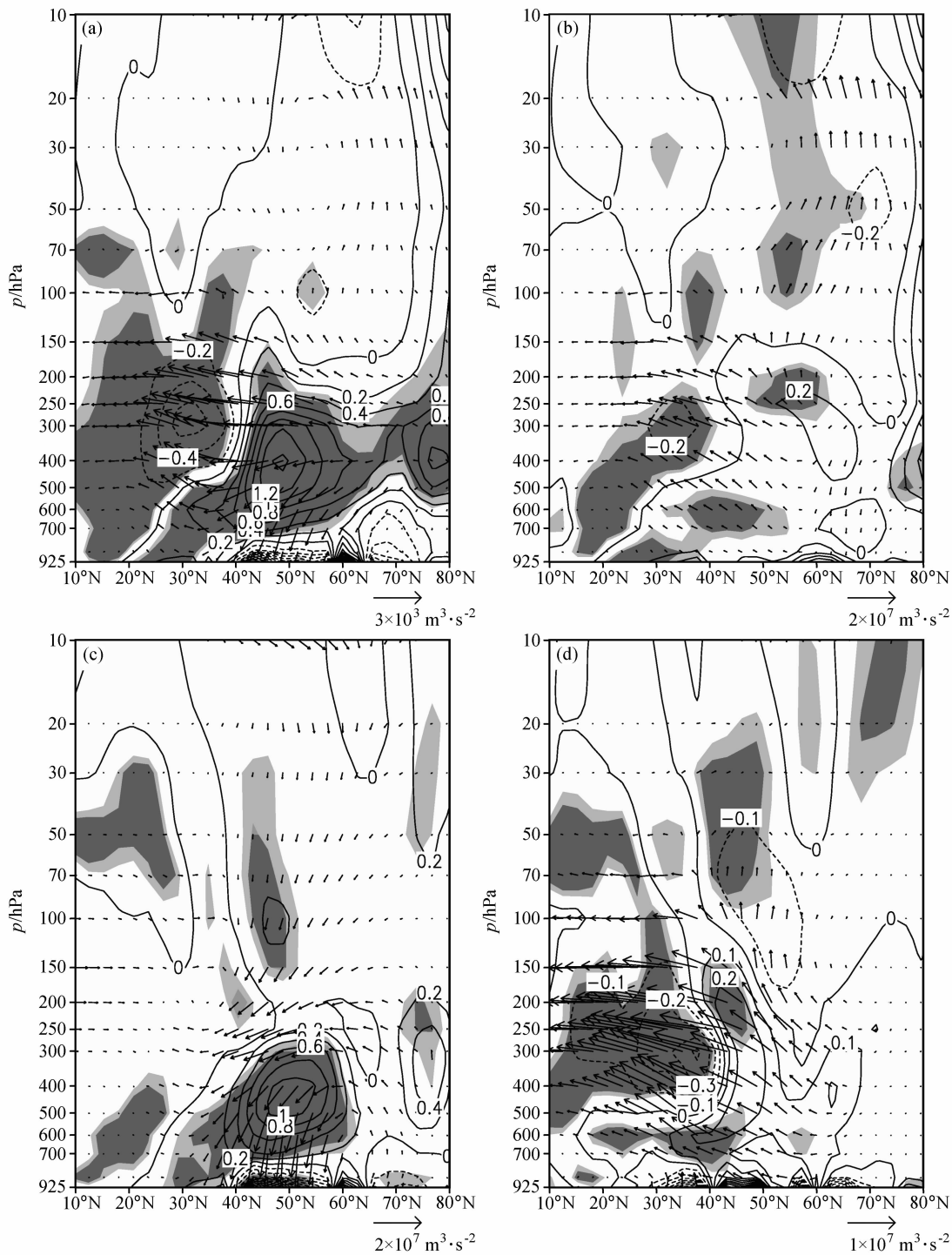


图6 行星波 EP 通量(矢量,单位: $m \cdot s^{-1} \cdot d^{-1}$)及其散度(等值线,单位: $m \cdot s^{-1} \cdot d^{-1}$)对 T1 的回归(模拟): (a) 1~3 波合成; (b) 1 波; (c) 2 波; (d) 3 波。深、浅阴影表示 EP 通量散度与 T1 的相关通过了 99%、95% 的统计检验信度

Fig. 6 Regression maps of the simulated EP flux (vector) for the planetary wave and its divergence (contour, units: $m \cdot s^{-1} \cdot d^{-1}$) on T1 index; (a) The sum of zonal wavenumbers 1 to 3; (b) wavenumber 1; (c) wavenumber 2; (d) wavenumber 3. The dark and light shadings indicate the correlation is significant above 99% and 95% level, respectively

验,与再分析结果非常相似,表明模式对于对流层行星波变化的模拟是比较理想的。

模式模拟与再分析结果的主要差异在于对流层上层和平流层。需要注意的是,模拟的平流层异常

形势与 T1 的相关甚至没有通过 95% 的统计信度检验, 也就是说模拟的与 T1 对应的平流层形势是不可信的。

4.2 与北极涛动(AO)的关系

首先, 对冬季平均的海平面气压场(SLP)进行 EOF 分析, 分析区域限定在 20°N 以北, 得到的第一模态所解释的方差量占总方差的 43.58%, 将其第一分量的时间序列定义为模拟的冬季 AO 指数。将模拟的 AO 指数与再分析资料的 AO 指数相比较发现, 二者几乎没有相关。图 7b 是海平面气压场 EOF 第一分量的分布, 与文献[4]的 AO 形势大致相似, 表现为北极地区与附近纬圈之间气团的一个“跷跷板”形势, 但是这一模态所解释的方差百分比几乎是文献[4]结果的 2 倍。

以下将对模式模拟的 AO 形势与再分析结果的 AO 形势作对比分析。图 8 是观测和模拟的位势高度场对 AO 指数的回归和相关分布, 考虑了 1000 hPa、

500 hPa、50 hPa 三个等压面。可以看到, 在地面(图 8a、b)和 500 hPa(图 8c、d), 模式成功地模拟了 AO 形势下的位势高度异常, 即表现为极地区域和中纬度带的一个南北振荡, 对应于 AO 的高指数态, 北极地区位势高度偏低, 而中纬度位势高度偏高, 这一形势在地面是近于纬向对称的, 而在高空则更倾向于一种波状结构。然而在平流层下层, 模拟结果与再分析结果有比较明显的差异, 50 hPa 位势高度的异常形势表征了极涡的强弱, 从再分析结果也可以看到, AO 高指数时, 北极区域是一个深厚的负异常。但从模拟结果来看, 位势高度的负异常有相当程度的扭曲和倾斜, 分裂为两个负中心, 而正异常却伸入了极地, 这也表明模式对于平流层异常形势的模拟并不理想。

对纬向平均风场和温度场与准定常行星波年际变化相联系的异常形势进行分析发现, 模拟的纬向平均风异常形势(图 9a)在对流层与再分析结果很

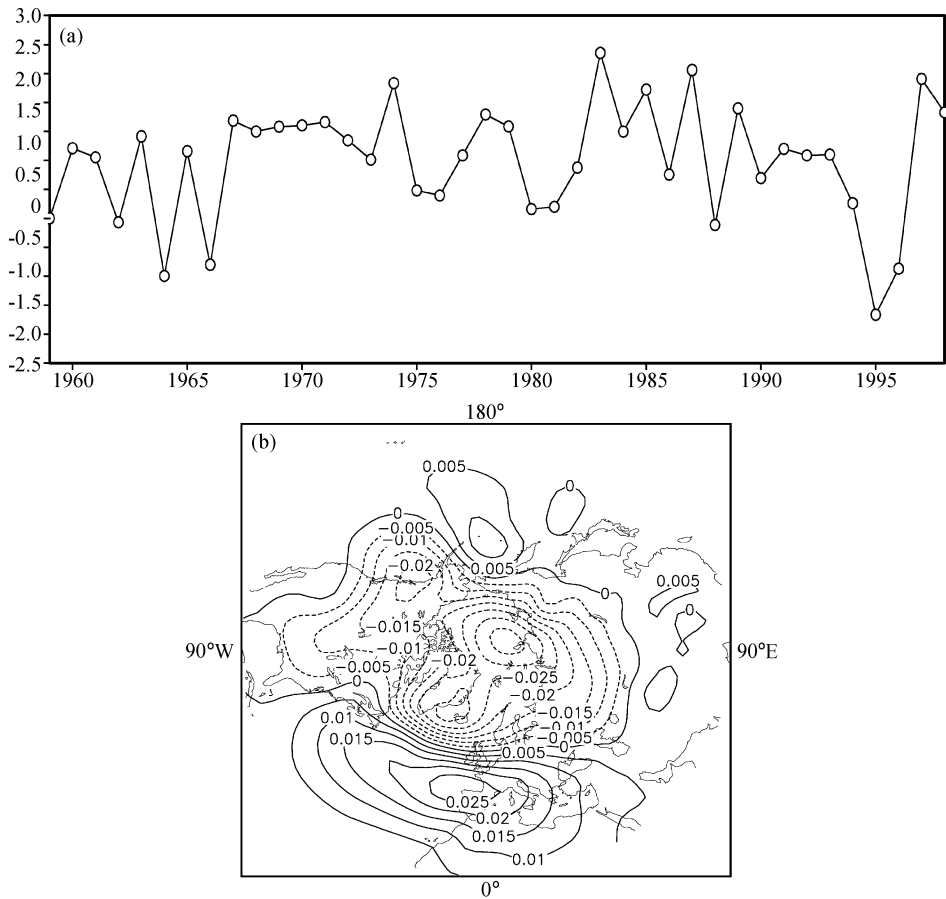


图 7 模式模拟的冬季 AO 指数(a)以及海平面气压场(SLP, 单位: hPa)的 EOF 第一分量(b)

Fig. 7 (a) The simulated winter AO index; (b) the simulated first EOF component of sea level pressure (units: hPa)

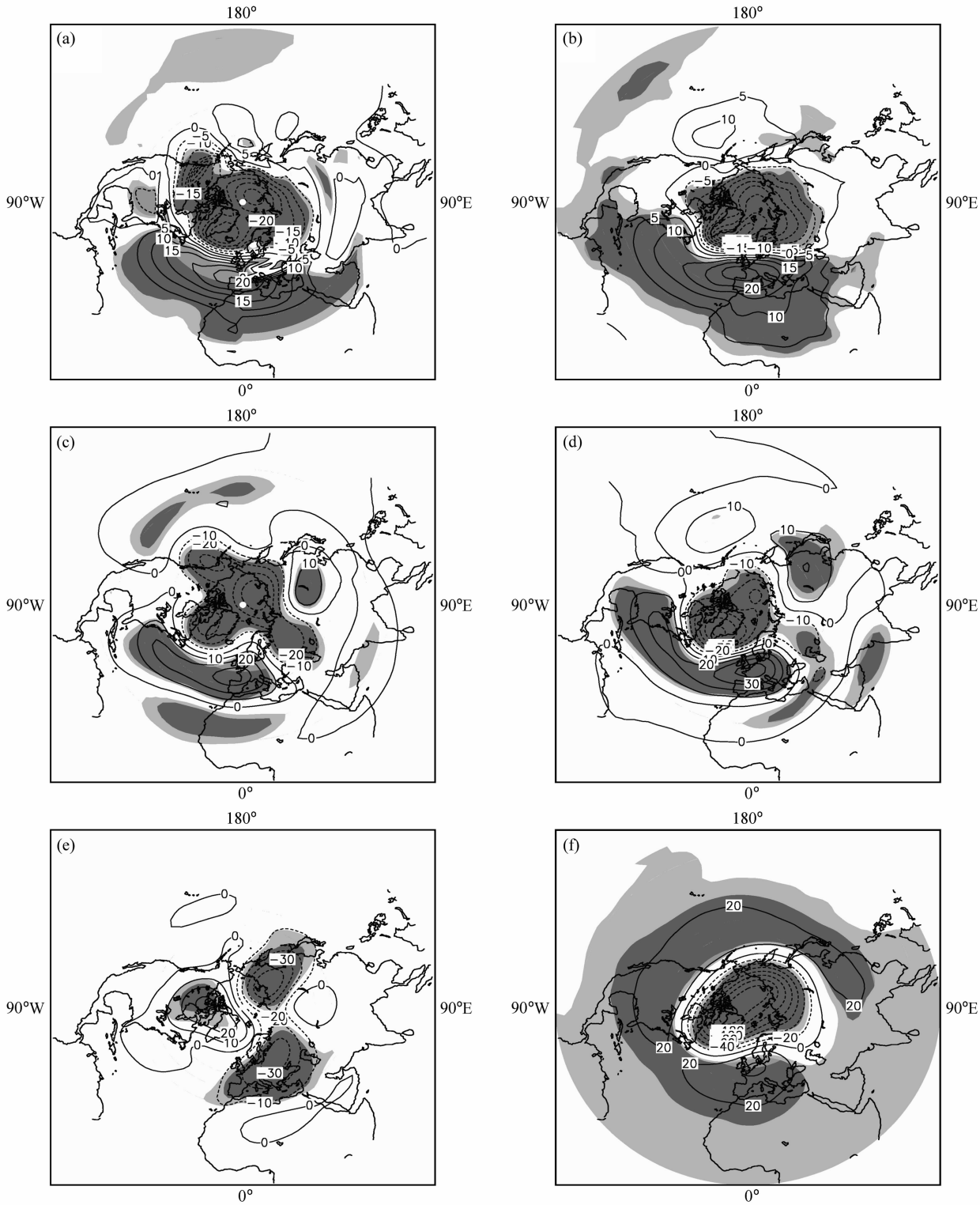


图 8 模拟(a、c、e)和观测(b、d、f)的位势高度场(单位: gpm)对冬季 AO 指数的回归和相关: (a)、(b) 1000 hPa; (c)、(d) 500 hPa; (e)、(f) 50 hPa。深、浅阴影区表示与 AO 指数的相关通过了 99%、95% 的统计信度检验

Fig. 8 Regression and correlation maps of the simulated (a, c, e) and observed (b, d, f) geopotential height (units: gpm) on the winter AO index: (a), (b) 1000 hPa; (c), (d) 500 hPa; (e), (f) 50 hPa. The dark and light shadings indicate the correlation is significant above 99% and 95% level, respectively

一致, 大约 35°N 和 55°N 纬度带的纬向风表现出一
种“跷跷板”形势, 即 T1 高指数时, 中高纬度的纬
向西风增强, 低纬度的纬向西风减弱, 这一形势的
相关通过了 99% 的信度检验。但在平流层, 这种异
常形势几乎与再分析结果完全相反, 仍然呈现一个
偶极子的变化, 但在 T1 高指数时, 却表现为大约
55°N 纬度带的西风减弱, 而大约 35°N 纬度带的西
风增强。对纬向风场作 EOF 分析也发现, 其 EOF
第一分量的分布(图 9c)并不像再分析结果那样呈
现一个南北振荡的两极形势, 而是在高纬度的对流
层上层和平流层有一个负异常, 负异常把原有的偶
极子型向低纬度挤压, 整体形势近似于一个三极子
分布。模拟的纬向平均温度场异常形势则是与纬向
风场的异常相对应的, 如图 9b 所示。模拟与再分
析的差异下降到了更低的层次, 模式只对对流层低
层的温度异常给出了比较一致的模拟, 而在对流层
中上层和平流层都与再分析结果相反, 表现为高
纬度地区纬向平均温度的正异常与 T1 的高指数相
对应。对纬向平均温度的模拟表明, 模式对平流层
模拟的不足在一定程度上可能会影响模拟的对流
层异常形势。

模拟的位势高度场对 T1 的回归(图 10)与对
冬季 AO 指数的回归形势在 1000 hPa, 500 hPa,

50 hPa 三个等压面都非常相似, 并且 T1 与冬季
AO 指数的相关系数为 0.79, 远远超过了 99% 的
统计检验信度。上述分析表明, 就模拟结果而言,
准定常行星波的年际变化与冬季 AO 形势同样有
着非常密切的联系。同样地, 这种模拟形势只在
对流层与再分析结果一致, 而在平流层存在显著
差异。

上述对模式模拟结果的分析发现, 模式对于对
流层异常形势能够作出非常好的模拟, 但对于平
流层的模拟却并不理想。图 11 分别给出 NCEP 再
分析资料和模式模拟的 1959~1998 年冬季纬向平
均风的标准偏差分布。从再分析结果可以看到, 纬
向平均风变化最大的两个区域是热带平流层, 以
及高纬度对流层上层和平流层, 即极涡和热带纬
向风的准两年振荡是纬向风两个主要的变化形
势。但从模式模拟结果来看, 标准差的两个大值
区分别是在低纬度对流层上层和高纬度平流层,
并没有能够模拟出热带平流层下层纬向风的准
两年振荡, 并且就极涡而言, 与再分析资料相比,
极涡的变化被明显削弱了。对纬向平均风标准偏
差的分析表明模式可能在平流层加了比较强的
阻尼, 使得平流层的变化大大衰减, 我们推测这
可能是模式不能正确模拟平流层异常形势的主
要原因。

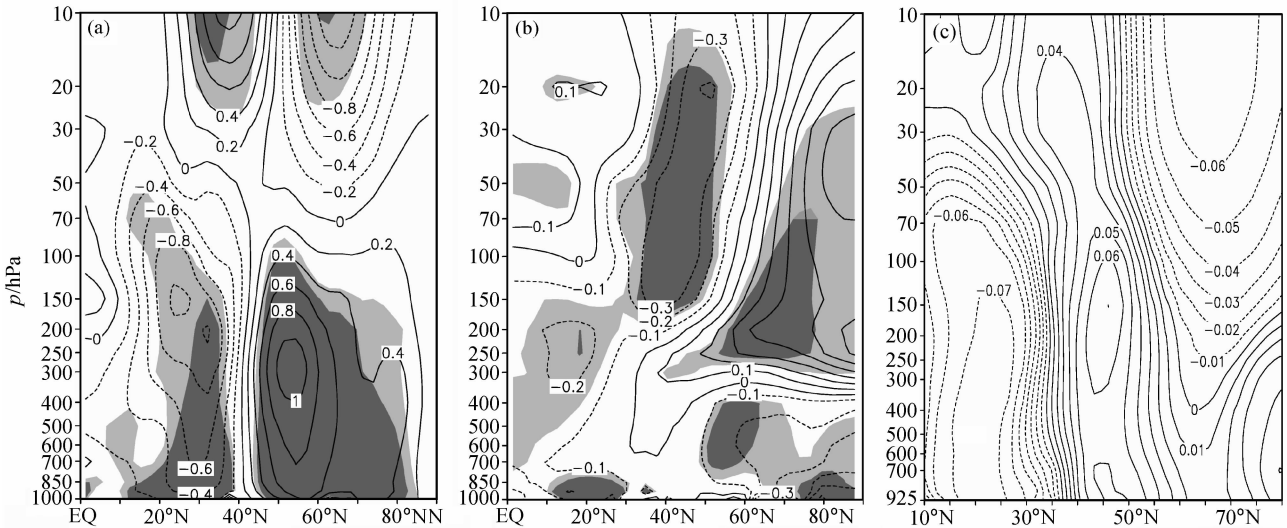


图 9 模式模拟得到的纬向平均风(a, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和温度场(b, 单位: K)对 T1 的回归以及纬向平均风的 EOF 第一分量(c)。深、浅阴影表示与 T1 的相关通过了 99%、95% 的统计信度检验

Fig. 9 Simulated (a) zonal-mean zonal wind (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (b) zonal-mean temperature (units: K) regressed on T1 index, and (c) first EOF of zonal-mean zonal wind (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). The dark and light shadings indicate the correlation is significant above 99% and 95% level, respectively

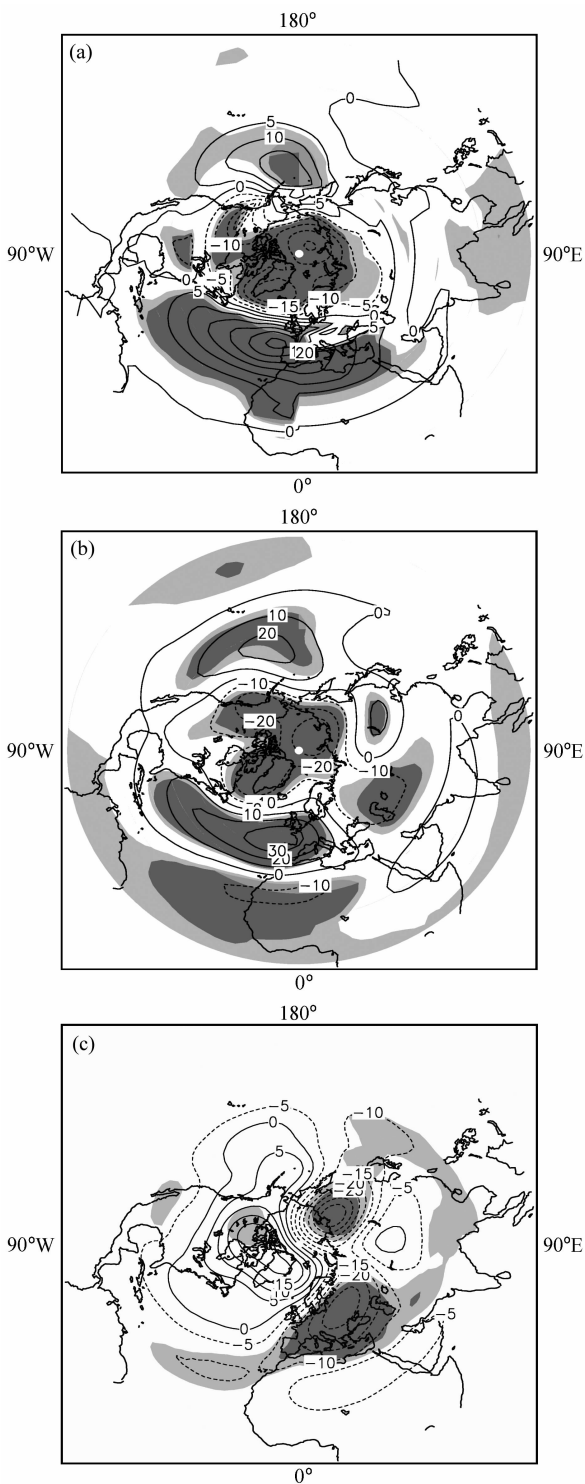


图 10 模拟得到的位势高度场(单位: gpm)对 T1 的回归和相关: (a) 1000 hPa; (b) 500 hPa; (c) 50 hPa。深、浅阴影表示与 T1 的相关通过了 99%、95% 的统计信度检验
Fig. 10 Regression and correlation maps of the simulated geopotential heights (units: gpm) on T1 index; (a) 1000 hPa; (b) 500 hPa; (c) 50 hPa. The dark and light shadings indicate the correlation is significant above 99% and 95% level, respectively

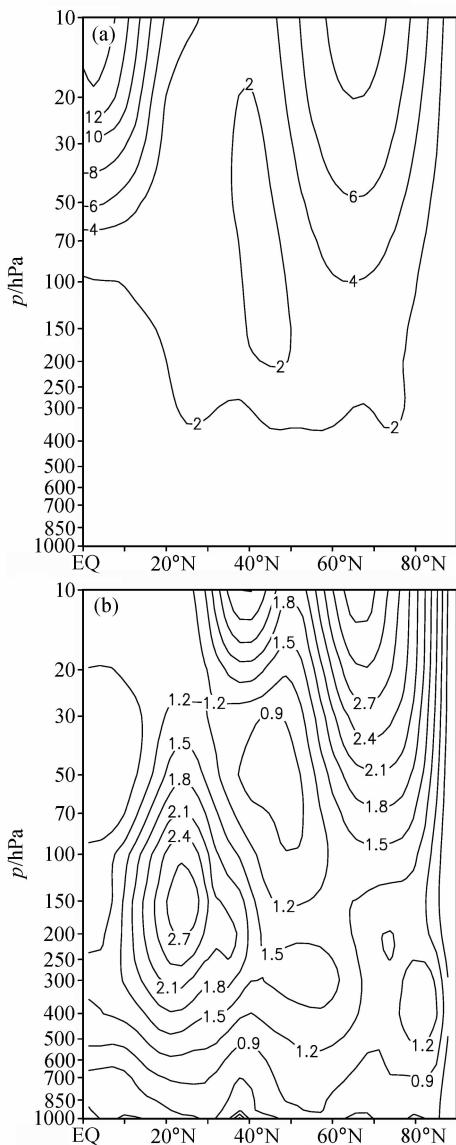


图 11 1959 年~1998 年冬季纬向平均风场的标准偏差(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) NCEP 再分析资料结果; (b) 模式模拟结果
Fig. 11 Standard deviation of the winter zonal-mean zonal winds from 1959 to 1998 for the NCEP reanalysis (a) and simulation (b). Units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

5 结论

本文利用 1958/1959 ~ 1997/1998 冬季的 NCEP/NCAR 再分析资料和 CCSR/NIES AGCM Ver. 5.6 模式, 对北半球冬季准定常行星波的年际变化进行了资料分析和数值模拟。结果显示, 北半球冬季准定常行星波存在明显的年际振荡, 这一变化形势可以用 EP 通量散度的第一主分量来表示, 本文将其第一主分量的时间序列 T1 定义为行星波

年际变化指数。

对再分析资料的分析结果表明, 对应于 T1 的高指数, 在对流层和平流层低层, 准定常行星波更多地折向赤道传播, 而折向高纬度经极地波导向上传播的行星波活动被削弱了, 很明显, 准定常行星波的经向传播与通过极地波导的上传是相互联系的。具体到各波数分析发现, 中纬度对流层 EP 通量散度异常的偶极子形势主要是来自 3 波贡献, 2 波则对偶极子形势的正异常有重要作用, 与 2 波和 3 波相比, 1 波对对流层形势几乎没有影响。高纬度沿极地波导的异常辐散形势则主要来自于 1 波和 2 波, 特别在平流层低层, 1 波和 2 波对 EP 通量的异常辐散具有相似的贡献, 表现出与 T1 的正相关。但 1 波和 2 波的异常传播在平流层中上层与 T1 的关系却有所不同, T1 的高指数态下, 1 波更多地折向极地传播, 且向上传播明显减弱, 而 2 波则是更多地向中低纬度传播。其原因有待于进一步研究。与 T1 相关的纬向平均风场异常呈现一个相当正压的偶极子结构, 从对流层延伸到平流层; 纬向平均温度场也有类似的南北振荡; 位势高度场对 T1 的回归形势表现为北极地区与中纬度带的南北涛动形势。比较发现, 所有这些异常都与 AO 形势下的异常非常相似, 特别是 T1 与冬季 AO 指数的相关达到了 0.87, 由此推断准定常行星波的年际变化与北极涛动有着密切的联系。

利用大气环流模式模拟的结果显示, 在对流层, 模式成功地模拟了准定常行星波的年际振荡, 与北极涛动对应的位势高度场异常分布, 以及与行星波年际变化相联系的纬向平均风场、纬向平均温度场和位势高度场的异常形势。但模拟结果在平流层与再分析结果有着明显的差别, 模式对于相应平流层环流异常形势的模拟并不理想, 这也是当前大气环流模式普遍存在的问题。此外, 模式模拟的准定常行星波年际变化指数和冬季 AO 指数与再分析结果相关很小, 这表明虽然模式能够模拟出相应的对流层异常变化形势, 但是具体到各年, 与观测还是有着相当的差异。研究已经知道, 对流层与平流层是一个相互影响的耦合系统, 平流层的异常会对对流层产生相应的影响, 因此, 如果模式对于平流层的模拟有所偏差, 必然也会影响到对于对流层的模拟。要搞清楚平流层对流层耦合作用的物理机制, 模式模拟研究是必不可少的, 而这就需要模式

能够比较准确地模拟出平流层的相应变化, 这也对今后的模式发展提出了更高的要求。

参考文献 (References)

- [1] Qurióz R S. Tropospheric-stratospheric polar vortex breakdown of January 1977. *Geophys. Res. Lett.*, 1977, **4**: 151~154
- [2] Nigam S. On the structure of variability of observed tropospheric and stratospheric zonal-wind. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 1799~1813
- [3] Baldwin M P, Cheng X, Dunkerton T J. Observed correlations between winter-mean tropospheric and stratospheric circulation anomalies. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**: 1141~1144
- [4] 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
- [5] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. *J. Climate*, 2000, **13**: 1000~1016
- [6] Dunkerton T J. Midwinter deceleration of the subtropical mesospheric jet and interannual variability of the high latitude flow in UKMO analysis. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**: 3838~3855
- [7] Christiansen B. Downward propagation of zonal mean zonal wind anomalies from the stratosphere to the troposphere: Model and reanalysis. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 27307~27322
- [8] Zhou S, Miller A J, Wang J, et al. Downward-propagating temperature anomalies in the preconditioned polar stratosphere. *J. Climate*, 2001, **15**: 781~792
- [9] Black R X. Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic Oscillation. *J. Climate*, 2001, **15**: 268~277
- [10] Perlwitz J, Graf H - F. Troposphere-stratosphere dynamic coupling under strong and weak polar vortex conditions. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 271~274
- [11] Perlwitz J, Harnik N. Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection. *J. Climate*, 2003, **16**: 3011~3026
- [12] 陈文, 黄荣辉. 准定常行星波对大气中臭氧输运的动力作用. *大气科学*, 1995, **19**: 513~524
Chen Wen, Huang Ronghui. The dynamics of planetary wave transport on ozone in atmosphere. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1995, **19**: 513~524
- [13] 陈文, 黄荣辉. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究(I)定常流的情况. *大气科学*, 1996, **20**: 513~523
Chen Wen, Huang Ronghui. The numerical study of seasonal and interannual variabilities of ozone due to planetary wave

- transport in the middle atmosphere (I) the case of steady mean flows. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1996, **20**: 513~523
- [14] 陈文, 黄荣辉. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究(II)波流相互作用的情况. *大气科学*, 1996, **20**: 703~712
- Chen Wen, Huang Ronghui. The numerical study of seasonal and interannual variabilities of ozone due to planetary wave transport in the middle atmosphere (II) the case of wave-flow interaction. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica)*(in Chinese), 1996, **20**: 703~712
- [15] 陈文, 杨蕾, 黄荣辉, 等. 热带准两年振荡影响北半球冬季大气环流的诊断分析. *大气科学*, 2004, **28**: 161~173
- Chen Wen, Yang Lei, Huang Ronghui, et al. Diagnostic analysis of the impact of tropical QBO on the general circulation in the Northern Hemisphere winter. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2004, **28**: 161~173
- [16] Chen W, Takahashi M, Graf H F. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 24, 10.1029/2003JD003834
- [17] <http://www.cdc.noaa.gov>
- [18] Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly mean CD-ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **78**: 2539~2558
- [19] Numaguti A, Takahashi M, Nagajima T, et al. Description of CCSR/NIES atmospheric circulation model. CGER's Supercomputer Monograph Report, Center for Global Environmental Research. National Institute for Environmental Studies, 1997, No. 3, 1~48
- [20] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 699~706
- [21] Rind D, Shindell D T, Loneragan P, et al. Climate change of the middle atmosphere, Part III: The doubled CO₂ climate revisited. *J. Climate*, 1998, **11**: 876~894
- [22] <http://horizon.atmos.colostate.edu/ao/Data/index.html>
- [23] DeWeaver E, Nigam S. Do stationary waves drive the zonal-mean jet anomalies of the northern winter? *J. Climate*, 2000, **13**: 2160~2176