

模式气候的球谐谱分析*

曹鸿兴

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要 对模拟的气候场用球谐函数作波谱分析, 得到了全球 500 hPa 高度和海平面气压在不同截断时的波谱特征以及由 CO_2 倍增 ($2 \times \text{CO}_2$) 引起的流场变化。与用经验正交函数 (EOF) 对模式气候作分析不同, 球谐波谱分析能清晰显示大气波动的物理图像, 尤其是全球大气低频波。另外, 试图通过分析 $2 \times \text{CO}_2$ 和 $1 \times \text{CO}_2$ 时的模拟环流, 解释造成全球增暖的环流背景特征。

关键词: 谱分析; 气候模拟; 温室效应

1 引言

在以往许多利用大气环流模式或海气耦合模式的模拟结果进行气候分析的论文中, 一般都给出 10 年或 10 年以上的平均图, 即通过时间滤波计算格点上的月平均或年平均, 多半没有作空间上的平滑。借助于球谐函数分析, 许多观测诊断研究已获得有意义的结果, 其原因是采用这种处理可以辨别大振幅的流型或者说是可以辨别那些排除了小振幅扰动的准定常情况下的流型^[1,2]。本文利用英国气象局的气候模式, 运用球谐函数展开, 深入研究了该模式模拟的 500 hPa 等压面高度场和海平面气压场的特征, 并对照观测结果, 研究了模拟的现在气候 ($1 \times \text{CO}_2$) 特征, 同时给出了 CO_2 倍增 ($2 \times \text{CO}_2$) 情形下气候的可能变化。

在验证气候模拟效果的工作中, 经验正交函数 (EOF) 是较为广泛应用的方法, 目的是对照模式气候的 EOF1 和实测气候的 EOF1, 以判断模拟结果的优劣。本文是首次运用球谐谱分析来研究模式气候。

数值模拟是用英国 Hadley 气候中心的高分辨模式进行的。模式的动力框架、物理过程以及数值计算见文献[3, 4]。对现在气候的模拟进行了 10 年, 以作为控制试验; 敏感性试验针对由二氧化碳倍增引起的气候变化, 是一种平衡试验^[5]。通过研究两者的差值 (即 $X[2 \times \text{CO}_2] - X[1 \times \text{CO}_2]$) 来了解二氧化碳增加对全球增暖的影响。

2 球谐函数的计算

记纬度为 φ , 经度为 λ , 某个场 f 的球谐函数可由下式给出:

$$f(\lambda, \varphi) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^{N(m)} F_n^m P_n^m(\sin\varphi) e^{im\lambda}, \quad (1)$$

其中, $P_n^m(\sin\varphi)$ 为归一化勒让德函数, 为 φ 的实函数。一般将 $P_n^m(\sin\varphi)e^{im\lambda}$ 记为

$$Y_n^m(\lambda, \varphi) = P_n^m(\sin\varphi)e^{im\lambda},$$

称之为球谐函数, F_n^m 为 $Y_n^m(\lambda, \varphi)$ 的复系数, M 、 N 为谐波的截断数; m 为沿纬圈方向的纬向波数, n 为球谐函数的阶, $n-m$ 为经向波数。将一种场转换为球谐函数的方法遵循 Haseler 方式, 即该场中的量必须表示在经、纬度网格上或 Kurihara 网格上且作快速傅里叶变换。这里, 我们使用了英国气象局后处理程序包中的球谐函数程序。

(1) 式中, M 和 N 为球谐波的截断水平, 即沿纬圈和经圈分解的最大波数。截断有两种方式可供选择: 一种是三角截断, 即 $M=N$ 它可以在全球给出相同空间分辨率; 另一种方式为平行四边形截断。本文采用三角截断。令 $T=M=N$ 。在研究 CO_2 倍增时, 选取 $M=N=21$ 作为一种主要的截断水平。另外, 为了显示大气中的准定常波, 还分别选用了 $M=N=5$, $M=N=10$ 两种截断水平。

3 模拟场与实际观测场的比较

我们使用 500 hPa 高度场 (图 1) 和海平面气压场来检验模拟场。总的来说, 1 月份 500 hPa 模拟高度场 (图 1b) 与观测的高度场 (图 1a) ^[6] 相当一致。如主要槽、脊的强度和位置与观测场相一致。但是, 模拟的阿留申低压过深, 在南半球中心为 513 位势什米的低压没有模拟出来。7 月份, 模拟的 500 hPa 高度场的总体形势与观测 (图略) 很相似。有一个明显的缺陷便是在副热带由 588 位势什米等高线包围的高压没有很好模拟出来, 而该系统在通常的副热带气象研究中被认为是具有很好代表性的基本气候特征。在南极大陆, 模式夸大了低压系统。

至于在海平面上, 模式模拟的 1 月份的气压分布与观测也大体上一致。阿留申低压和亚速尔低压模拟得相当好。然而, 观测到的大尺度的西伯利亚高压, 在模拟图 (图略) 上却呈现为一些分散的高压。在 30°S 的副热带高压被很好地模拟出来。7 月份, 模拟的海平面气压一般形势与观测一致, 尤其是位于 30°S 的副热带高压区。但模拟的北半球副热带高压的强度要弱一些。

4 模式气候中环流分量的谱表示

图 2 表示 1 月截断为 $T=5$ 、10、21 时北半球海平面气压的球谐函数分布。图 2a 表示当 $T=5$ 时的低频分量, 两高两低的流型出现在中高纬地区, 西伯利亚高压最为强大。冰岛低压及阿留申低压清晰地显示在图 2b 上 ($T=10$)。 $T=21$ 的球谐函数已能相当好地描绘海平面气压分布的总体图像 (图 2c)。图 3 为 7 月份海平面气压场截断分别为 $T=5$ 、10、21 时的球谐函数, 其形势具有夏季的特点, 完全不同于 1 月份的形势。显然, 副热带系统在 7 月份成了北半球环流的主要角色, 尤其是北太平洋高压和印度低压起着举足轻重的作用, 这在 $T=5$ 的球谐函数分布 (图 3a) 上表示得最为清晰。对比图 3c, 北大西洋高压与北太平洋高压强度已相当, 由此可推断, 低频分量对北太平洋高压的贡献大。总之, 通过对模式气候场的球谐谱分析, 我们可以清晰地了解全球环流

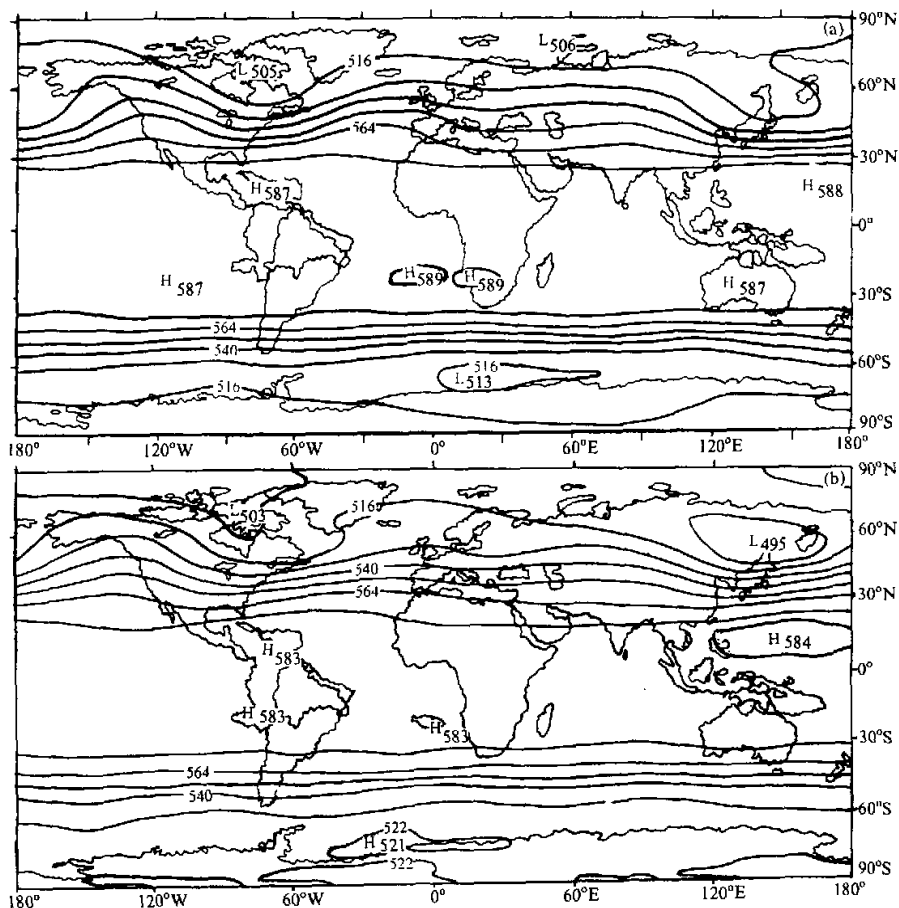


图1 全球1月500 hPa高度气候场

(a) 观测 (1979~1986年观测平均); (b) 模拟 (10年模拟值平均)。L表示低压, H表示高压

的各个分量, 尤其是低频分量。当我们用其研究 CO_2 倍增对气候的影响时, 这种长处依然存在。

5 由 CO_2 倍增引起的环流变化

当 CO_2 增加1倍时, 全球500 hPa等压面位势高度普遍增加, 极涡向极地移动, 同时伴随着经圈环流的减弱, 副热带高压明显加强。这可以从全球 $\Delta H_{500} = H_{500}[2 \times \text{CO}_2] - H_{500}[1 \times \text{CO}_2]$ 图上看, 无论1月或7月没有任何地方出现差值 ΔH_{500} 为负值。 $2 \times \text{CO}_2$ 时环流变化的另一个特点是行星波槽脊的位置变化不大, 可能是 $2 \times \text{CO}_2$ 强迫

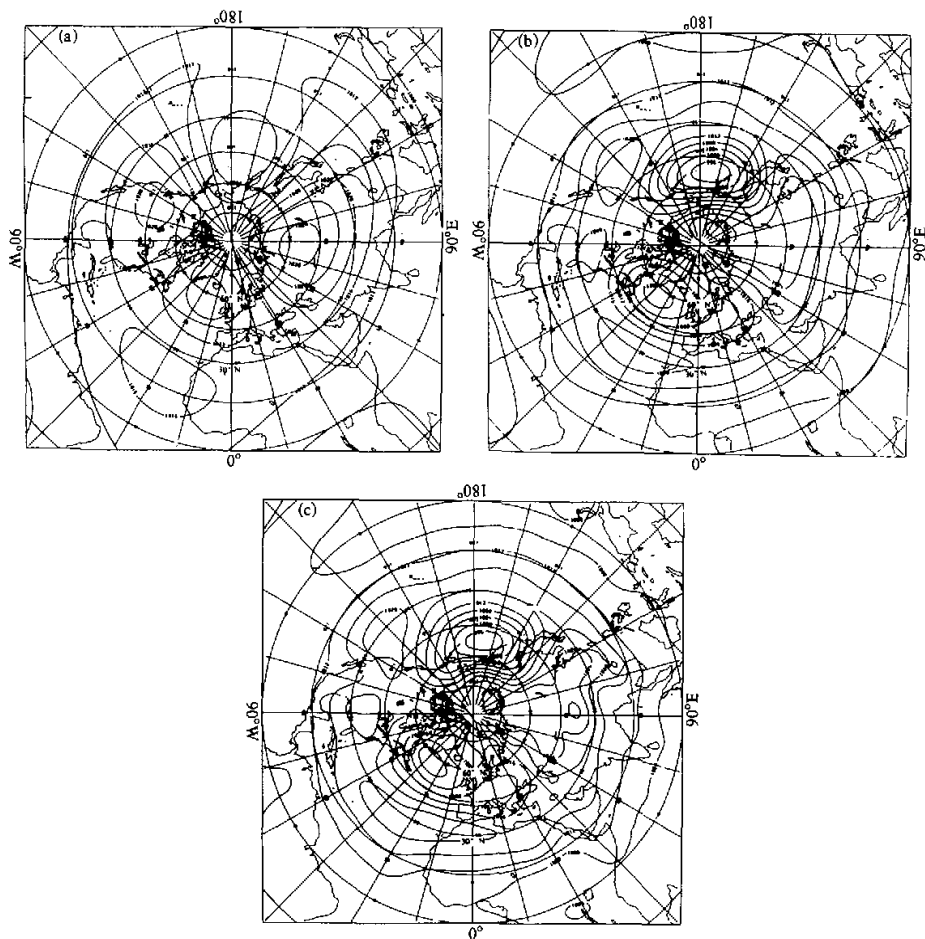


图2 1月北半球海平面气压的球谱函数分布
(a) $T=5$; (b) $T=10$; (c) $T=21$

作用尚不足以改变由海陆分布和大地形形成的槽脊位置。

在1月500 hPa $T=5$ 的球谱函数分布(图4)上, $2\times\text{CO}_2$ 时副热带高压有着显著的全球性加强, 表征极涡的500位势什米线向极地移动并显著收缩, 极涡中心偏向亚洲的特征已不明显, 说明当今的西伯利亚冷中心将因增暖而显著减弱。因为盛行纬向环流, 北极的冷空气不能向南输送得更多。由于副热带高压偏北加强, 热带和赤道的暖空气沿着副热带高压气流输送到中高纬地区, 其结果造成自赤道到极地的普遍增温, 它是 CO_2 增温效应的环流背景。也就是在 $2\times\text{CO}_2$ 时, 盛行一种类似于现在气候中的“热夏”环流。类似情况也出现在7月 $T=21$ 时的环流变化, $T=21$ 的球谱函数值分布也几近纬向型(图略), 最大差值中心在乌拉尔山西侧。副热带地区也有强的全球性增值带,

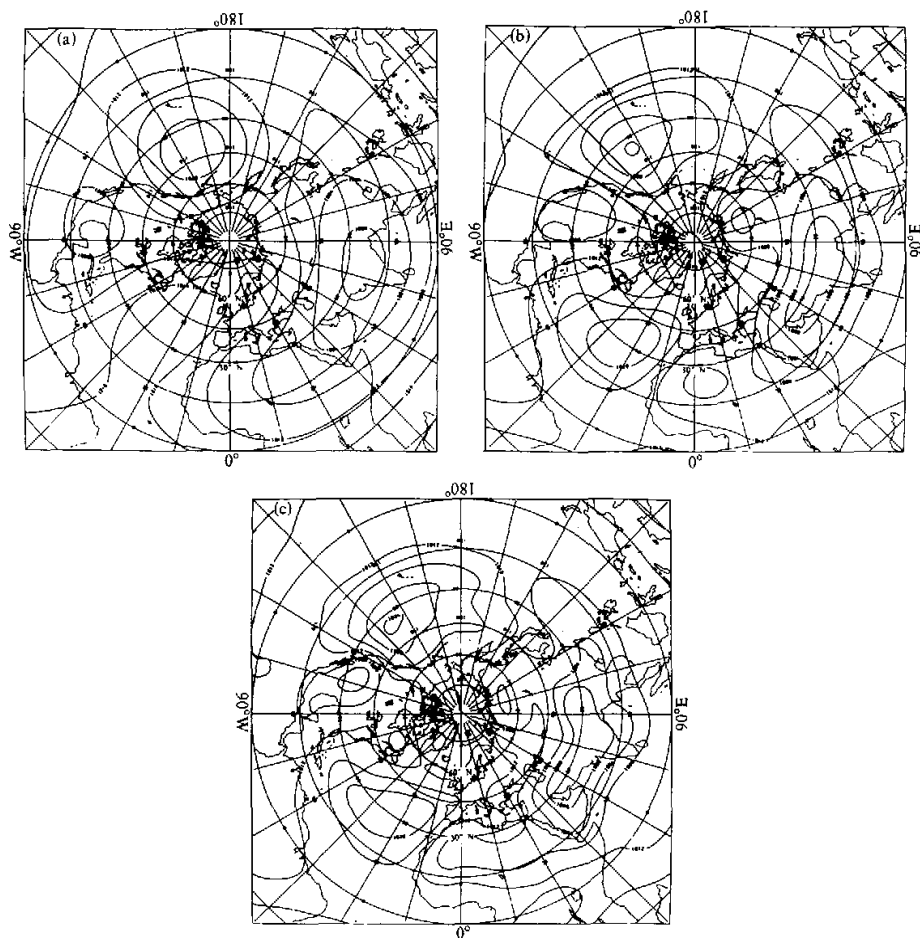
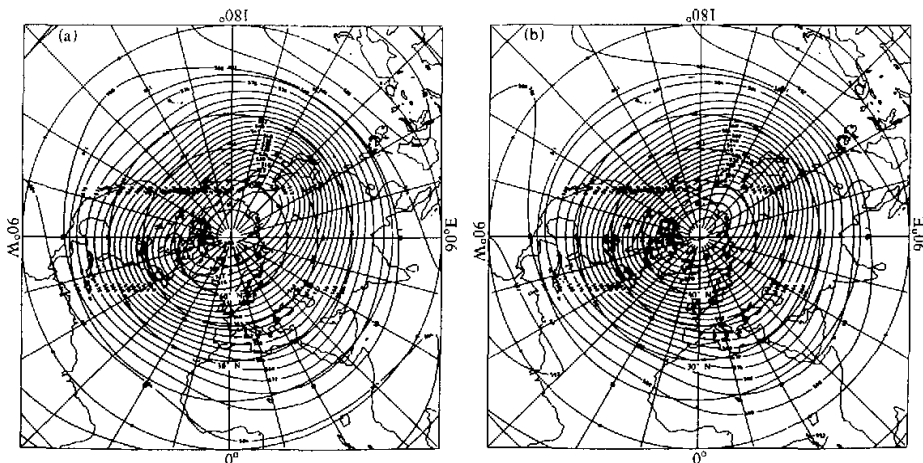
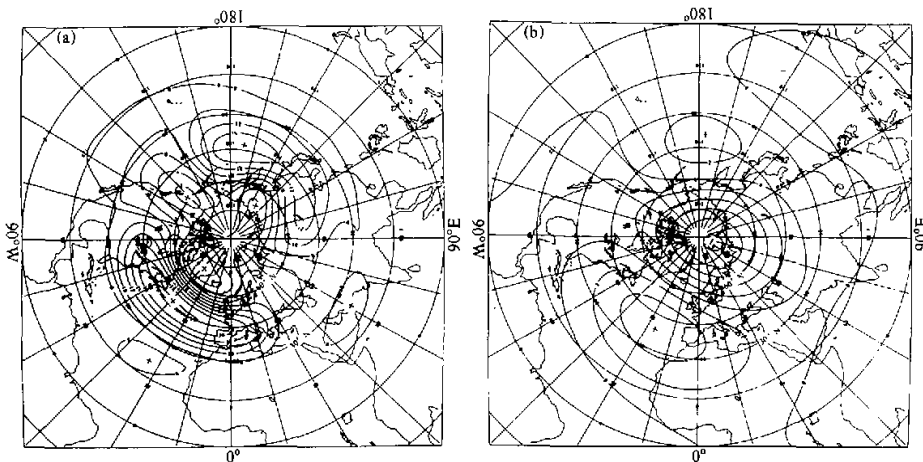


图3 7月北半球海平面气压的球谱函数分布
(a) $T=5$; (b) $T=10$; (c) $T=21$

反映了副热带高压系统的全球性北移和增强。图 5a 为 $T=21$ 时 1 月 500 hPa 高度差值 ΔH_{500} 图, 差值最大中心分别在北大西洋北部和北太平洋北部, 差值区沿纬向盘踞了很大范围。这表示冬季行星槽脊减弱, 纬向气流盛行, 其后果是在北半球中高纬地区易出现暖冬。这正是 $2 \times \text{CO}_2$ 造成全球变暖的冬季环流背景。图 5b 显示出了 $T=5$ 时海平面气压差值分布。30° N 以南大部分为 0 差值区, 说明 $2 \times \text{CO}_2$ 时低频分量对副热带高压的贡献不明显。在极区, 有一个强大的减值区, 中心在 -12 位势什米以上。这说明了 $2 \times \text{CO}_2$ 时低频分量对极涡北缩减弱有大的贡献。分析 $T=21$ 时 1 月海平面气压的差值图 (图略) 发现, $2 \times \text{CO}_2$ 时高频分量对阿留申低压和冰岛低压减弱有显著贡献。这说明高低频分量在全球变暖时对不同大气环流系统的改变的作用是不同的。

图4 $T=5$ 时的北半球 1 月 500 hPa 高度图(a) $1 \times \text{CO}_2$; (b) $2 \times \text{CO}_2$ 图5 1 月北半球 CO_2 倍增引起的场变化(a) $T=21$ 时的 500 hPa 高度; (b) $T=5$ 时的海平面气压

6 结语

对由气候模式模拟的全球平均环流用球谱分析进行了研究。结果表明, 球谱波的低频分量能清晰显示全球和半球的主要环流系统。当 CO_2 增加 1 倍时, 地面和高空的流场发生显著变化, 纬向环流盛行, 但沿纬圈的行星槽脊位置变化不大。在 CO_2 倍增时, 高低频分量对高空和地面不同环流系统的贡献是不同的, 高空环流的变化远大于地面环流。副热带高压的显著增强并向两极方向移动, 极地涡旋收缩, 构成了 CO_2 倍增

时的环流背景。

本文运用球谐谱分析对由模拟所得气候场进行了初步分析,表明这种分析对模式气候的诊断是有效用的,今后可以作为气候诊断的一种工具。

致 谢 本文的计算工作是作者在英国 Hadley 气候预测与研究中心工作期间完成的,作者对 J. F. B. Mitchell 博士和 J. R. Lavery 先生在学术和程序上的帮助深表感谢。

参 考 文 献

- 1 Epstein, E. S., A spectral climatology, *J. Climate*, 1988, 1, 88~107.
- 2 Barker, T. W. and J. D. Horel, Quasi-stationary regimes in the Northern Hemisphere of the NCAR Community Climate Model, *J. Climate*, 1988, 1, 406~417.
- 3 曹鸿兴, 气候动力模式与模拟, 北京: 气象出版社, 1994, 104~109.
- 4 Senior, C. A. et al., The dependence of climate sensitivity on the horizontal resolution of a GCM, *J. Climate*, 1995, 8, 2860~2880.
- 5 Cao Hongxing, J. F. B. Mitchell and J. R. Lavery, Simulated diurnal range and variability of surface temperature in a global climate model for present and doubled CO₂ climates, *J. Climate*, 1992, 5, 920~943.
- 6 Trenberth, K. E. and J. G. Olson, ECMWF global analyses 1979-1986: Circulation statistics and data evaluation, NCAR Tech. Note TN-300+STR, 1988, 94pp.

Spectral Analysis of Model Climate with Spherical Harmonics Function

Cao Hongxing

(China Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract The simulated climate fields were decomposed with the spherical harmonics function and the corresponding spectral analysis was made, thus the spherical harmonics feature of global 500 hPa height and the sea level pressure in several truncations was investigated and the field changes on doubling CO₂ were analyzed too. In comparison with model climate analysis by use of the EOF, the spherical harmonics spectral analysis can better reveal the physical pattern of atmospheric waves. From analyzing the simulated fields on 2 × CO₂ and 1 × CO₂, an attempt of interpreting the causes of global warming was made.

Key words: spectral analysis; climate simulation; greenhouse effect