

准两年振荡对大气中微量气体 分布的影响*

张 弘 陈月娟

(中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026)

吴北婴

(中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘 要 NCAR 的包含化学、辐射、动力相互作用的两维模式 (SOCRATES) 移植回国后进行了初步的模拟试验, 用以研究某些对环境问题重要的微量气体的化学、辐射、动力传输过程。在不考虑极地平流层云和气溶胶表面非均相化学等情况下, 模式积分多年, 计算结果稳定, 模拟的风场、温度场显示出正常的季节变化, 模拟的微量气体分布与卫星实测资料对照, 结果也比较一致。为了探讨热带平流层风场的准两年周期振荡 (QBO) 对平流层微量气体分布的影响, 我们做了 QBO 强迫的数值试验, 即在模式中加入 QBO 强迫, 并与不考虑 QBO 强迫的模拟结果对比。结果表明, QBO 与其相关的次级环流所引起动力输送的变化, 使平流层微量气体分布发生变化。

关键词: 准两年振荡; 平流层微量气体; 二维化学输送模式

1 引言

地球气候系统是非常复杂的变化着的体系, 引起地球气候变化的因子很多, 其中大气化学组成的变化与全球气候变化关系十分密切。大气中的许多微量气体在地气系统的辐射收支、能量平衡中起着决定性作用。这些成分浓度的变化会对地球气候系统造成明显的扰动。观测事实表明, 大气化学组成正在发生变化, 包括碳氟烃 (CFCs) 从本不存在到相当量级的全球平均浓度、大气二氧化碳和甲烷浓度逐年增加、大气臭氧总量减少趋势等, 特别是“臭氧洞”现象的出现, 引起各国政府和科学家的普遍关注。自 1985 年 Farman 等首先指出南极哈利湾站 ($75^{\circ}31'S$, $26^{\circ}44'W$) 臭氧总量在南半球春季特别是在 10 月份有着极其明显的下降趋势, 每年都观测到南极臭氧洞现象。最近, 周秀骥等发现中国地区上空臭氧总量也在不断减少, 并且青藏高原夏季存在明显的臭氧耗损, 出现青藏高原臭氧低值中心。这些变化会导致全球性和区域性的气候变化, 对环境生态平衡造成破坏, 对人类社会产生发展产生影响。为了研究大气成分的变化及其引起的气候变化, 人们在全球监测、动力和光化学理论、数值模拟等方面进行了深入的研究, 取得了重要成果。

在平流层与对流层的物质交换, 热带和副热带及极区的物质输运方面, 由于涉及的

中层大气的动力过程很多,如行星波、重力波及波流相互作用等,对于这方面的认识还不透彻。而热带波动与基本气流相互作用所产生的 QBO 也是一个重要的动力过程。自 Reed 和 Rogers 于 1961 年发现了热带平流层下层纬向平均气流的准两年振荡以来,人们对 QBO 的研究越来越深入。QBO 的基本特点是振荡周期基本上为两年,振荡现象一般由 30 km 高度向下传播,在传播过程中振幅基本不变化,直至 23 km 以下振幅迅速减弱,振荡向下传播的速度约为每月 1 km,并且振荡现象相对赤道呈对称分布。Lindzen 和 Wallace 成功地解释了 QBO 的产生机理,认为是垂直传播的长周期重力波和纬向风相互作用的结果。Plumb^[1]指出,通过与之相关的平均经圈环流作用, QBO 会影响热带平流层低层气体成分分布,如 N_2O 、 CH_4 、 H_2O 和气溶胶等。Bowman^[2]等研究了高纬地区纬向平均的 O_3 总量的准两年振荡,得到了较好的 QBO 信号。Hollandsworth 等^[3]的资料分析表明 O_3 含量的 QBO 信号从 5 hPa 到平流层低层都显著存在, O_3 总量的 QBO 相对赤道呈对称分布,赤道和中高纬 O_3 总量的 QBO 都与热带平流层纬向风场和温度场有很好的相关。Hess^[4]的数值模拟研究发现 QBO 对 O_3 输送的影响产生了赤道外 O_3 的 QBO 信号。O'Sullivan^[5]通过数值试验,讨论了冬季 QBO 不同位相强迫对微量气体输送的影响,结果表明,由于准定常行星波不能穿过东风带,导致热带外混合区微量气体分布梯度很大,在热带的混合较少;西风位相时,某些 Rossby 波可以穿过赤道西风带而在夏半球破碎引起混合。Schoeberl^[6]认为与 QBO 相关的次级环流调制着微量气体和气溶胶在热带和低纬的梯度分布,微量气体扰动分布和 QBO 两者的位相关系与赤道和中纬物质交换很敏感,据此可以估计两区之间的物质混合交换率。数值模拟是目前研究大气中微量气体成分发生变化及对气候影响的有效方法。为了探讨热带平流层风场的 QBO 对平流层微量气体分布的影响,我们利用 NCAR 的包含化学、辐射、动力相互作用的两维模式进行了数值试验,在模式中加入 QBO 强迫,并与不考虑 QBO 强迫的模拟结果对比,得到一些结果。本文将简要介绍这些结果。

2 模式和试验

2.1 模式简介

NCAR 的包含化学、辐射、动力相互作用的二维模式^[7],用以模拟研究对环境问题重要的微量气体的化学、辐射、输送过程。自 1990 年模式经过多次完善。模式垂直范围从地面到 120 km 高度,垂直分辨率 1 km,水平范围从南纬 85° 到北纬 85°,格距 5°。

动力场($\bar{u}$, $\bar{v}^*$, $\bar{w}^*$, $\bar{\theta}$) 在纬向平均下的热力方程、动力方程、质量连续方程、热成风关系用变形欧拉经向环流($\bar{v}^*$, $\bar{w}^*$)表示:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{v}^* \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{w}^* \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} &= Q_S + Q_{IR} + D_\theta, \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \eta \bar{v}^* + \bar{w}^* \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= F_R + F_G + F_T, \\ \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}^* \cos \varphi) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_0 \bar{w}^*) &= 0,\end{aligned}$$

$$\left(f + 2\bar{u} \frac{\tan \varphi}{a}\right) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{g}{\theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y},$$

其中 η 是绝对涡度, D_θ 是涡旋热通量扩散项。 F_R 、 F_G 、 F_T 分别是行星波、重力波和潮汐波强迫。这些强迫项及其相关的扩散项是纬向风的函数, 根据线性波理论求解。虽然模式中对波强迫作了参数化, 但这些波动可以响应平均流并与之相互作用。

辐射部分中, 净非绝热加热率由 Q_S 和 Q_{IR} 组成, 其中 Q_S 是太阳短波辐射加热率, Q_{IR} 是长波辐射冷却率, 采用 NCAR CCM1 的计算方案。

模式化学部分包含了 74 种化学成分和 130 多个化学反应。化学成分分为三类: 长寿命气体和化学族、中等寿命气体和短寿命气体。因不同寿命气体对于化学和动力过程敏感性不同, 分别采用不同的连续-输送方程。作为可选项, 模式中可加入极地平流层异相化学、气溶胶化学等。

2.2 试验方案

如前所述, QBO 是垂直传播的热带波动动量传输的结果。由于模式分辨率等问题, 迄今全球环流模式 (GCM) 还不能在平流层环流中模拟出赤道平流层纬向风和温度的 QBO 特征及其相应的经向环流。QBO 强迫的解析式可以从热带观测的纬向风场求出, 用以得到平流层的 QBO 强迫环流和温度振荡。由于二维模式不显式求解动量方程的纬向分量, 所以在流函数方程中加入 QBO 强迫来模拟温度场 QBO 及相关环流。QBO 强迫虽然是规定好的, 不响应其他纬向平均要素, 但利用这个参数化, 模式可以检验平流层中不同的 QBO 强迫辐射、输送和化学反馈效应。根据热带观测结果, 模式^[8]中热带 16~40 km 高度的 QBO 可表示成

$$\begin{aligned} \bar{u}_{QBO} = & -\bar{u}_{\max} \exp\left[-\left(\frac{\varphi}{\varphi_w}\right)^2\right] \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_w}\right) \cos\left(\frac{z - z_{\max}}{h_{QBO}} \pi\right) \\ & \cos\left(2\pi \frac{t-1}{t_{QBO}} + 2\pi \frac{z - z_{\max}}{z_{\text{hfwd}}}\right), \end{aligned}$$

h_{QBO} 是 QBO 垂直范围 (24 km), t 是天数, t_{QBO} 是周期 (821 天, 约 27 个月), $u_{\max}$ 是最大振幅, 为 25 m/s。QBO 扰动是纬度的高斯函数, φ_w 是高斯纬宽 (15°)。扰动随高度正弦变化, 最大值在 $z_{\max}$ (28 km), 半宽 $z_{\text{hfwd}} = 27$ km。根据赤道 β 平面热成风关系及一般认为的 QBO 扰动场有以赤道为中心的经向高斯分布, 则可求得 $\partial \bar{T} / \partial t$, 作为 QBO 强迫进而求出流函数。这样, 环流和温度场都受到 QBO 的调制。为了探讨 QBO 强迫对平流层微量气体分布的影响, 我们在模式中加入 QBO 强迫, 积分 6 年。

2.3 QBO 形态

图 1a 给出的是 NCAR SOCRATES 二维模式模拟的有 QBO 强迫与无 QBO 强迫的纬向风差值在 28 km 高度随时间的演变。可见模式中模拟出明显的 QBO 现象。在不同位相强迫下纬向风场变化范围大致相同, 基本上在 30° 纬圈以内, 相对赤道呈对称分布。QBO 东风位相下扰动最大值是 -7 m/s, 西风位相下扰动最大值是 7 m/s。

图 1b 是 QBO 强迫下温度扰动在 28 km 高度随时间的分布。温度扰动与纬向风扰动分布明显不同, 温度扰动落后于纬向风扰动大约 8 个月左右。温度变化在 $\pm 15^\circ$ 纬圈

以内与 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 纬圈变化趋势相反, 中高纬变化不大; 温度扰动也基本上相对赤道呈对称分布。不同位相强迫下的温度扰动变化范围大致相同, 但变化趋势相反。不同位相强迫下的温度扰动最大值是 2 K。

图 2a 是赤道上空 20~40 km 高度范围 QBO 强迫下纬向风扰动随时间的分布, 可以明显看出扰动随时间向下传播的特征, 到 22 km 以下振幅迅速减小。其中东风位相强迫的纬向风扰动的最大振幅是 -7 m/s , 在西风位相强迫下最大振幅是 7 m/s , 不同位相强迫下的纬向风扰动最大值的高度也较一致, 大约在 28~34 km。

图 2b 是赤道上空 20~40 km 高度范围 QBO 强迫下温度扰动随时间的分布, 同样可以看出扰动随时间向下传播的特征, 但传播速度没有纬向风扰动传速快, 位相滞后, 并且最大振幅所处高度也低, 大约在 22~24 km。不同位相强迫下的温度扰动最大振幅是 3 K。

综上所述, 模式的 QBO 参数化方案能较好地刻划 QBO 强迫。

3 QBO 对微量气体分布影响的模拟结果

3.1 无 QBO 强迫微量气体分布

在不考虑极地平流层云和气溶胶表面非均相化学及没有 QBO 强迫的情况下, 模式

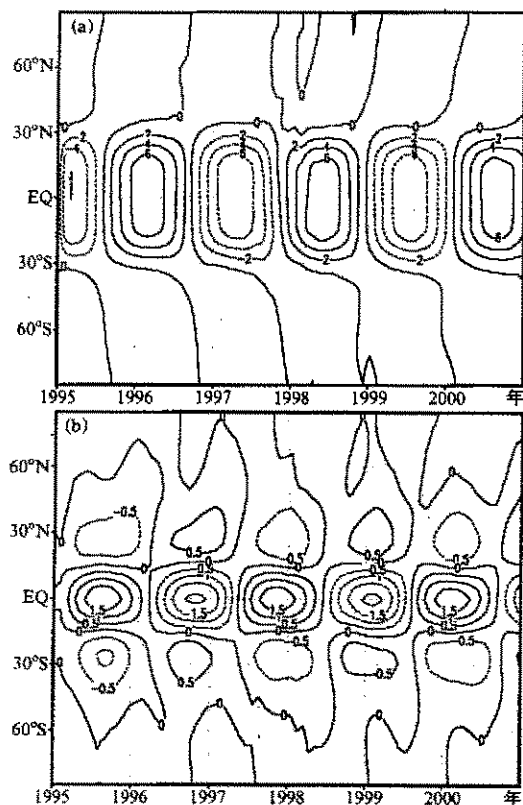


图 1 QBO 强迫下纬向风扰动 (a) 和温度扰动 (b) 在 28 km 高度随时间的分布

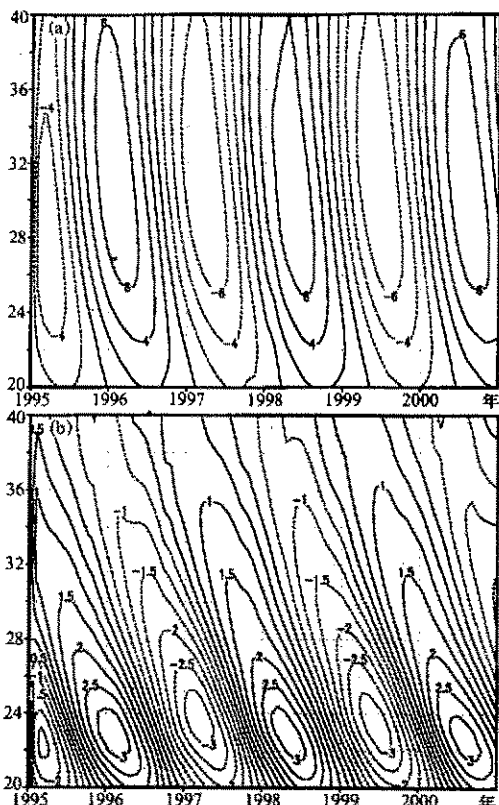


图 2 QBO 强迫下赤道上空纬向风扰动 (a) 和温度扰动 (b) 随时间的分布

积分多年, 计算结果稳定, 模拟的风场、温度场显示出正常的季节变化, 模拟的微量气体分布与卫星实测资料对照, 结果也比较一致。

图 3b 是设置在高层大气研究卫星 (UARS) 上的卤素掩星试验 (HALOE) 观测的 1997 年 4~5 月 O_3 混合比的纬度高度剖面, 其高值中心在赤道上空 10 hPa 附近, 平流层低层热带地区 O_3 混合比较相同高度上的中高纬地区小, 而 30 hPa 以上直到 1 hPa O_3 混合比分布的梯度相反, 1 hPa 以上高度 O_3 混合比分布比较均匀。图 3a 是模式模拟的 4 月 21 日 O_3 混合比的纬度高度剖面, 可见两者分布相当一致。

图 4b 是 HALOE 试验观测的 1997 年 4~5 月 HCl 混合比的纬度高度剖面。平流层低层热带地区 HCl 混合比较相同高度上的中高纬地区小, 从 100 hPa 到 0.1 hPa 高度 HCl 混合比递增, 而模式也较好地模拟出了这些分布特征 (见图 4a 所示模式模拟的 4 月 21 日 HCl 混合比的纬度高度分布)。

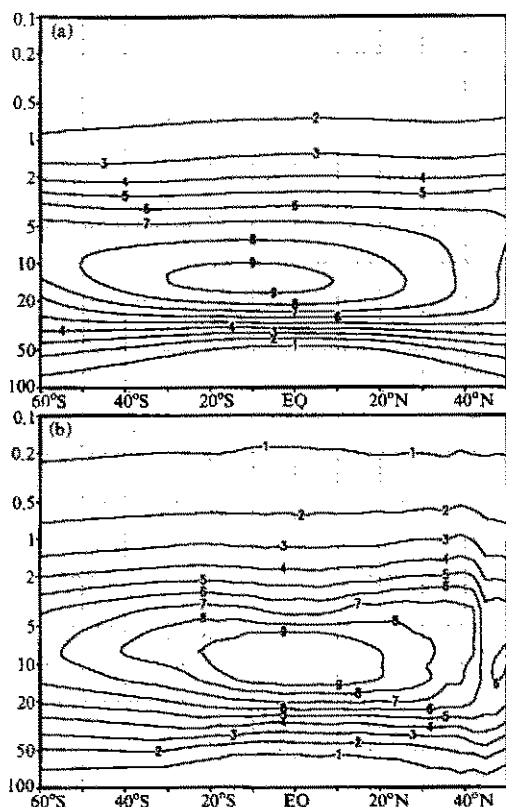


图 3 O_3 混合比的纬度高度剖面

(a) 模式模拟; (b) HALOE 试验观测

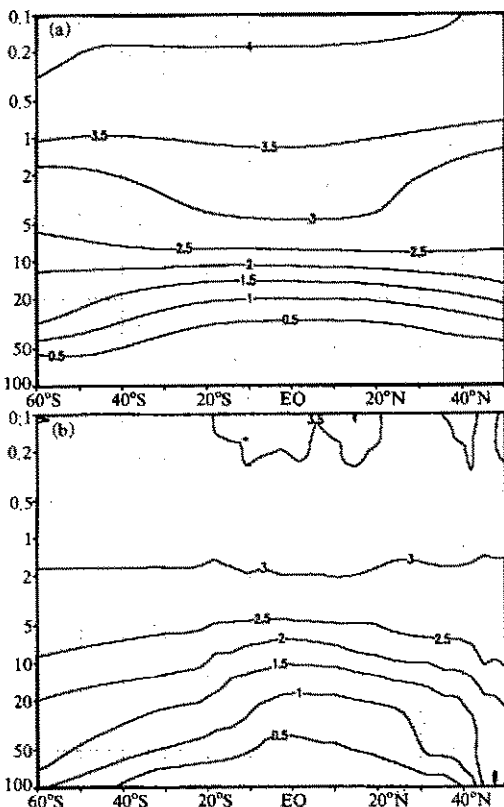


图 4 HCl 混合比的纬度高度剖面

(a) 模式模拟; (b) HALOE 试验观测

3.2 QBO 强迫下微量气体分布变化

图 5a 是模拟的赤道上空 20~40 km 高度范围 QBO 强迫下 O_3 混合比扰动随时间的变化。可以看出 O_3 扰动也呈现出 QBO 现象。不同位相下 O_3 变化幅度是 -0.6×10^{-6} ~ 0.7×10^{-6} , 相对变化幅度是 -15% ~ 20% 。值得注意的是 O_3 混合比扰动在 28 km 以上和 28 km 以下区域位相相反, 这种分布与纬向风扰动 (图 2a) 和温度场扰动 (图

2b) 不大一样。其形成原因将在下面讨论。

图 5b 是 QBO 强迫下 O_3 总量变化随时间的分布。不同位相下 O_3 总量变化分布趋势相反, 两者分布都相对赤道呈对称; 并且可明显看出赤道外中高纬 O_3 总量的 QBO 现象, 中高纬 O_3 总量变化与赤道 O_3 总量变化位相相反。赤道 O_3 总量变化与赤道纬向风场扰动同位相, 而赤道外中高纬 O_3 总量变化与之相反, 这与 Hollandsworth 等用热带 30 hPa 纬向风场和全球 O_3 总量资料所得的统计结果完全一致。不同位相下 O_3 总量变化幅度是 $-6 \sim 6$ DU, 相对变化幅度是 $-2.5\% \sim 3\%$ 。

其他长寿命气体 (CH_4 、 N_2O 等) 在 QBO 影响下其分布的变化大致相似。图 6a、图 6b 分别是 QBO 强迫下 CH_4 和 N_2O 混合比变化在 28 km 高度随时间的分布。扰动相对赤道呈对称分布, 与纬向风场的变化不同步, 而与温度场的变化位相相反。不仅赤道地区存在的 CH_4 、 N_2O 等的 QBO 信号, 而且赤道外地区的 CH_4 、 N_2O 等分布中也存在 QBO 特征。 CH_4 、 N_2O 的变化幅度分别是 $-60 \times 10^{-9} \sim 60 \times 10^{-9}$ 和 $-18 \times 10^{-9} \sim 12 \times 10^{-9}$, 其相对变化幅度分别是 $-8\% \sim 8\%$ 和 $-9\% \sim 15\%$ 。我们模拟到的赤道地区的 QBO 可以影响到赤道以外地区, 使赤道外地区的 O_3 、 CH_4 、 N_2O 等分布中也存在 QBO 特征, 这一结果与 Bowman 等人的研究结果一致。之所以发生这样的现象, 是由 QBO 所引起经圈环流的变化形成的。

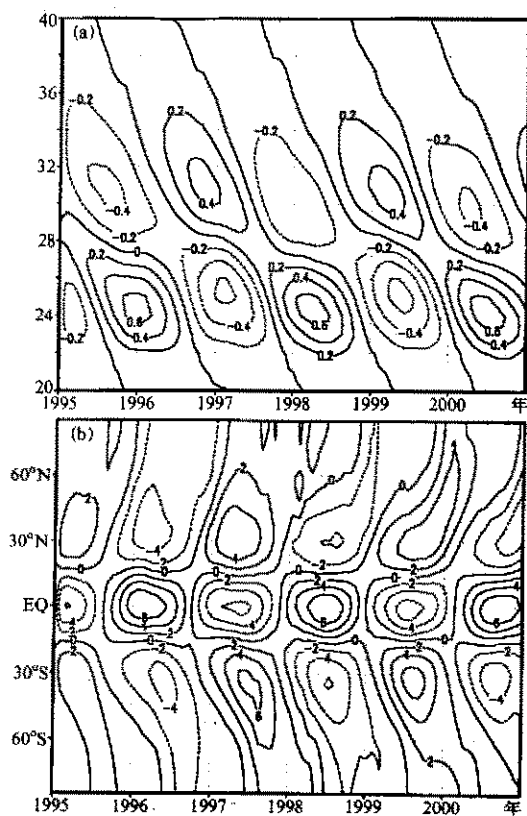


图 5 (a) 赤道上空 O_3 混合比扰动随时间的变化
(b) O_3 总量 (Dobson 单位) 变化随时间的分布

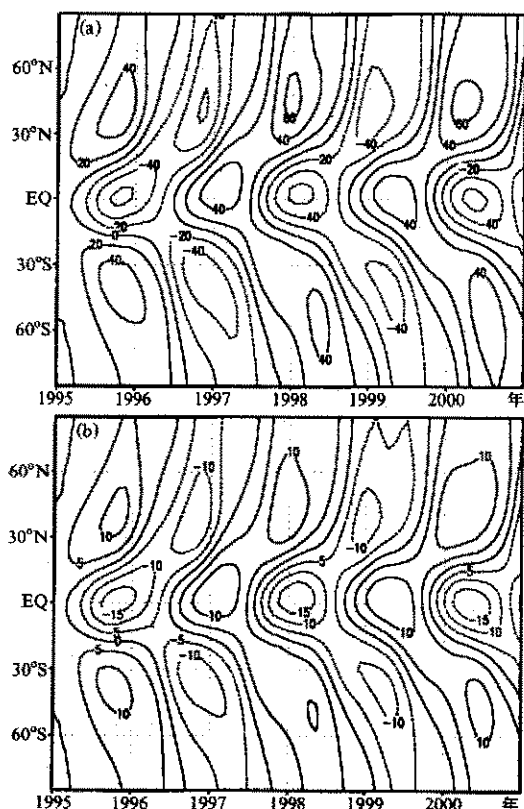


图 6 QBO 强迫下 CH_4 (a) 和 N_2O (b) 混合比
变化在 28 km 高度随时间的分布

图 7 是有 QBO 强迫下和无 QBO 强迫下模拟的经圈环流的差值图, 以下称此经圈环流的差值为 QBO 强迫下余差环流, 图 7a 和图 7b 分别是模式积分的第一年 10 月 and 第二年 11 月的余差环流分布。此余差环流相对赤道呈对称分布。积分第一年 10 月余差环流在赤道上空 20~34 km 高度下沉气流加强, 不利于地表源排放和对流层高值混合比的 CH_4 和 N_2O 向上输送, 因此 10 月 28 km 高度以上赤道地区 CH_4 和 N_2O 含量减少, 而南北纬 20° 以外地区此余差环流为上升气流加强, 余差环流的动力输送作用使 CH_4 和 N_2O 含量在中纬地区增大 (见图 6)。由于高值混合比的 O_3 在 30 km 左右, 赤道上空加强的下沉气流的存在, 使得 28~32 km 高度气层被上层含 O_3 较少的空气代替, 所以此气层 O_3 含量稍微减少 (见图 5a); 而赤道上空 22~26 km 被上层流下来的 O_3 含量高的空气代替, O_3 含量增加较多。这就是上面提到图 5a 的 O_3 混合比在 28 km 以上和 28 km 以下区域扰动位相相反的原因。30 km 高度以上温度异常和 O_3 含量异常是反位相的, 如图 3b 和图 5a 所示。同样, 南北纬 20° 以外地区此余差环流的方向与赤道地区相反, 由于余差环流的动力输送作用, 中纬地区 O_3 含量在 28~32 km 高度增大, 而在 22~26 km 范围减少。由于大气密度随高度呈指数衰减, 所以低层 O_3 混合比对 O_3 总量的贡献比高层要大得多。20~24 km 的混合比趋势基本决定了 O_3 总量的变化趋势。从此余差环流图还可以看到, 在 20~24 km 高度气层是 O_3 浓度较低的空气从赤道流向中纬地区, 因此对整个气柱 O_3 含量积分得到 O_3 总量时, O_3 总量在赤道附近增加, 在中纬地区减少, 即 O_3 总量的变化在赤道附近和中纬地区是相反 (见图 5b)。

积分第二年 11 月赤道上空 20~34 km 高度余差环流分布与第一年 10 月余差环流相反。由于余差环流的作用, 所以 CH_4 、 N_2O 和 O_3 变化的分布特征与前者完全相反, 于是得到如图 5 和图 6 所示的 QBO 强迫下 CH_4 、 N_2O 和 O_3 的扰动特征。

4 结论

(1) 在不考虑极地平流层云和气溶胶表面非均相化学等情况下, 模式可长时间积分, 计算结果稳定, 模拟的风场、温度场显示出正常的季节变化, 模拟的微量气体分布与卫星实测结果也较一致, 说明模式性能良好, 可用以研究对环境问题重要的微量

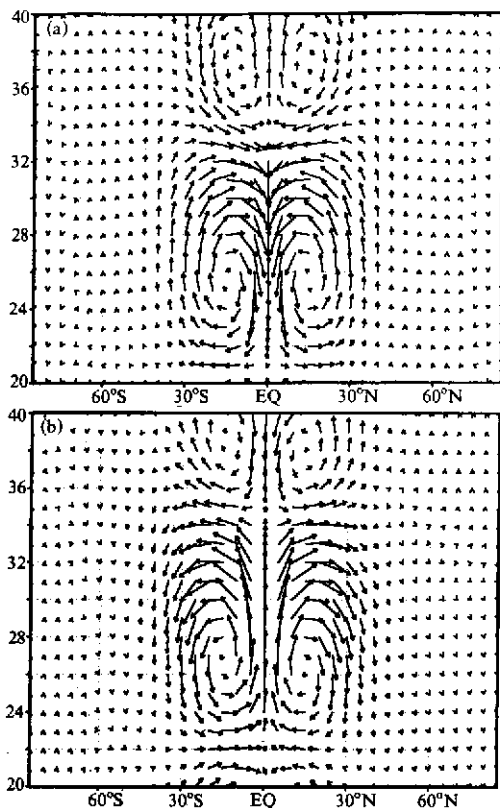


图 7 QBO 强迫下积分 (a) 第一年 10 月和 (b) 第二年 11 月余差环流分布

气体的化学、辐射、动力传输过程;

(2) 模式的 QBO 参数化方案能较好地刻划 QBO 强迫;

(3) 加入 QBO 强迫的数值试验结果表明, 热带平流层风场的准两年振荡不仅使赤道地区某些微量气体呈现出准两年振荡特征, 而且 QBO 引起余差环流, 使赤道外中高纬地区的微量气体分布也存在 QBO 特征。亦即 QBO 与其相关的次级环流所引起动力输送的变化, 使平流层微量气体分布发生变化。

参 考 文 献

- 1 Plumb, R. A. and R. C. Bell, A model of the QBO on an equatorial beta-plane, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1982, **108**, 335~352.
- 2 Bowman, K. P. et al., Global pattern of the QBO in total ozone, *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**, 3328~3343.
- 3 Hollandsworth, S. M. et al., Observational Study of QBO in Ozone, *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**, 7347~7361.
- 4 Hess, P. G. and D. O'Sullivan, A 3-D modeling study of the extratropical QBO in ozone, *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**, 1539~1554.
- 5 O'Sullivan, D. and P. Chen, Modeling the QBO's influence on isentropic tracer transport in the subtropics, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**, 6811~6821.
- 6 Schoeberl, M. R. et al., An estimation of the dynamical isolation of the tropical lower stratosphere using UARS Wind and trace gas observation of the QBO, *Geo. Res. Let.*, 1997, **24**, 53~56.
- 7 Brasseur G. M. et al., An interactive chemical dynamical radiative 2-D model of the middle atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**, 5639~5655.
- 8 Huang, T. et al., Description of SOCRATES, A Chemical, Dynamical, Radiative 2-D Model, Technical Report, NCAR, Boulder, Colorado, 1997, 28~29.

Impact of the Quasi-Biennial Oscillation on the Distribution of the Trace Gases in the Stratosphere

Zhang Hong and Chen Yuejuan

(Department of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Wu Beiyang

(Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract We have successfully used the interactive chemical, dynamical and radiative two-dimensional model of the mid atmosphere (SOCRATES, developed in NCAR) and carried out some incipient simulations to study the chemical, radiative and dynamical transportation processes in the stratosphere. Without considering the polar heterogeneous chemistry and sulfate aerosol heterogeneous chemistry, this model can be run for many years and the computing process and results are both robust and steadfast. Compared with the satellite observational data, the results are considerably consistent. In order to study the impact of the quasi-biennial oscillation (QBO) on the distribution of the stratospheric trace gases, we fulfilled a numerical simulation of QBO forcing and compared with the results simulated without imposing QBO forcing. The results show that QBO and the subsequent change of the dynamical transport caused by the QBO's related secondary circulation result in the variation of the distribution of the trace gases in the stratosphere.

Key words: quasi-biennial oscillation; stratospheric trace gas; 2-D chemical transport model