

# NO<sub>x</sub>的准两年周期变化及其与臭氧 准两年周期振荡的关系\*

## II. 模拟研究

郑 彬 陈月娟 张 弘

(中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026)

**摘 要** 利用 NCAR 的包含化学、辐射、动力相互作用的二维模式就纬向风的准两年周期振荡(简称 QBO)对平流层微量元素分布的影响进行数值模拟试验。模拟中,输入纬向风 QBO 的值,计算出 NO<sub>x</sub>、臭氧浓度和各种气象要素的垂直经向分布,并与不考虑 QBO 强迫的数值模拟结果进行对比。在第 I 部分 HALOE 资料分析的基础上,进一步讨论了在纬向风 QBO 的影响下 NO<sub>x</sub>浓度垂直分布的变化及其准两年周期振荡,并研究了 NO<sub>x</sub>的 QBO 与臭氧 QBO 的关系。结果表明:模拟六年平均的 NO<sub>x</sub>混合比分布与观测结果基本一致,并且在纬向风场 QBO 强迫下,NO<sub>x</sub>混合比扰动有明显的准两年周期振荡;与臭氧的 QBO 比较,发现在 28 km 以下,NO<sub>x</sub>的 QBO 与臭氧 QBO 同位相,而在 28 km 以上,它们则是反位相,与 HALOE 资料的观测结果基本吻合。文中对模拟得到的由于风场 QBO 引起的余差环流输送作用做了进一步的分析,并讨论了在不同高度的气层中余差环流的输送作用与 NO<sub>x</sub>破坏作用在臭氧 QBO 形成中的相对重要性。

**关键词:** 二维模式;氮氧化物;臭氧;准两年周期振荡

## 1 引言

在平流层,NO 主要是通过 N<sub>2</sub>O 与原子氧激发态的反应形成的,而 NO 可以很快与臭氧分子反应生成 NO<sub>2</sub>,使 NO 和 NO<sub>2</sub>成为平流层中重要的两种微量气体<sup>[1]</sup>。它们在平流层臭氧的光化学过程中,起着重要的作用,特别是在下平流层,与 HO<sub>x</sub>和 ClO<sub>x</sub>相比较,NO<sub>x</sub>对臭氧分子的破坏占主要地位<sup>[2]</sup>。因此,20 世纪 70 年代以来,在研究平流层臭氧耗损的同时,也对 NO<sub>x</sub>的分布和变化进行了一系列观测和研究。但是由于 NO<sub>x</sub>的高空观测主要是一些单站观测,而且时间不连续,所以对 NO<sub>x</sub>的空间分布和随时间演变特征研究得很少。只是在研究臭氧的准两年周期振荡(QBO)现象的同时,开始用数值模拟方法研究 NO<sub>x</sub>的 QBO 现象。Jones 等<sup>[3]</sup>模拟了风场 QBO 对平流层微量元素的输送,指出风场 QBO 会引导出一个经向环流,将长寿命的微量气体从热带地区向外输送并形成热带以外地区微量气体的 QBO。Chipperfield 等<sup>[4]</sup>用一个二维模式研究了 SAGE II 的 NO<sub>2</sub>和 O<sub>3</sub>的准两年周期信号,认为平流层中上层臭氧的 QBO 主要就是

由于  $\text{NO}_x$  的 QBO 强迫形成的。Huang<sup>[5]</sup> 在用一个 2-D 模式模拟研究太阳辐射对热带平流层臭氧准两年周期振荡影响的同时, 也得出了同样的结论。张弘等<sup>[6]</sup> 利用 NCAR 的包含化学、辐射、动力相互作用的两维模式 (SOCRATES) 模拟了赤道上空平均纬向风场的 QBO 对大气中微量气体分布的影响, 结果表明, 纬向风场 QBO 及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。这些模拟实验都表明, 热带纬向风场的 QBO 不仅能引起臭氧的准两年周期振荡, 同时也引起其他微量元素 (包括  $\text{NO}_x$ ) 的准两年周期振荡, 而且  $\text{NO}_x$  的准两年周期振荡与臭氧的 QBO 有一定的关系。为了验证这些数值模拟结果, 我们用 UARS 卫星上的卤素掩星试验 (HALOE) 的观测资料, 分析了 1992 年~2000 年  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  的垂直分布及其年际变化特征, 其结果证实了在平流层中低纬地区  $\text{NO}_x$  的混合比垂直分布和经向分布都确实存在着准两年周期振荡, 资料分析还表明,  $\text{NO}_2$  的 QBO 较  $\text{NO}$  更明显, 赤道上空的  $\text{NO}_x$  的 QBO 最明显, 北半球  $\text{NO}_x$  的 QBO 较南半球更明显, 而 20~5 hPa 的  $\text{NO}_x$  的 QBO 又较其他气层明显。该文中还对  $\text{NO}_x$  的 QBO 与臭氧 QBO 的关系进行了初步讨论, 得出: 在热带 30 km 以上,  $\text{NO}_x$  混合比的 QBO 与  $\text{O}_3$  混合比的 QBO 位相相反; 而中纬地区及 30 km 以下的热带, 它们有一个位相差, 但不完全相反。这些结果在我们的前一篇文章, 即本工作的资料分析部分中已有详细的叙述<sup>[7]</sup>。但是, 前面提到的前人的模拟结果只给出微量气体总量受风场 QBO 的影响而没有讨论它们垂直结构随时间的变化, 而且关于风场 QBO 引起的余差环流对  $\text{NO}_x$  在不同高度和不同纬度上的输送过程也没有进行仔细的讨论。为了进一步搞清楚  $\text{NO}_x$  的准两年周期振荡形成机理以及它与臭氧 QBO 的关系, 在对 HALOE 资料分析的基础上, 我们用 NCAR 的包含化学、辐射、动力相互作用的两维模式进行了六年的数值模拟试验。本文通过对模拟结果的详细分析, 不仅给出  $\text{NO}_x$  的 QBO 特征, 而且还着重讨论了在风场 QBO 不同位相下, 余差环流对  $\text{NO}_x$  在不同高度和不同纬度的输送特点, 以及相应的垂直结构的变化。

## 2 模式简介

NCAR 的包含化学、辐射、动力相互作用的二维模式<sup>[8]</sup>, 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 年以来, 模式经过多次完善, 垂直范围从地面到 120 km 高度, 垂直分辨率 1 km, 水平范围从 85°S~85°N, 格距 5°。

模式的动力学方程包含了在纬向平均下的热通量方程、动量方程、质量连续方程和热成风关系。方程中还包含了涡旋热通量扩散项, 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。

模式的辐射部分, 净非绝热加热率包括了太阳短波辐射加热率  $Q_s$  和长波辐射冷却率  $Q_{\text{IR}}$ , 采用 NCAR CCM1 的计算方案来计算。

模式的化学部分包含了 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。

在本试验中, 由于二维模式不显式求解动量方程的纬向分量, 所以在动量方程中采用参数化方法加入风场 QBO 强迫来模拟温度场 QBO 及相关环流。利用这个参数化, 模式可以检验平流层中不同的风场 QBO 强迫辐射、输送和化学反馈效应。

关于模式中风场 QBO 的表示方法, 模拟得到的风场和温度场的 QBO 形态以及风场 QBO 强迫对平流层微量气体分布的影响, 在文献 [6] 已有介绍, 这里不再赘述。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 NO<sub>x</sub>的准两年周期振荡

模拟结果的 NO 和 NO<sub>2</sub> 垂直分布与观测结果大致相似。NO 混合比有两个极值, 一个在高层 120 km 以上, 另一个在平流层 40~45 km 附近, 比 HALOE 观测结果偏低约 3~4 km; NO<sub>2</sub> 混合比只有一个极值, 位于平流层 35~40 km, 接近臭氧的峰值区位置, 与 HALOE 观测结果相同。下面我们主要分析 NO<sub>x</sub> 的准两年周期振荡。

图 1 是在纬向风 QBO 强迫下的赤道上空 NO<sub>x</sub> 混合比扰动 (有 QBO 强迫条件下模拟的 NO<sub>x</sub> 混合比与没有 QBO 强迫模拟的 NO<sub>x</sub> 混合比之差) 随时间的变化。从图 1a 中 NO 混合比的扰动可以看出, 在 25~36 km 气层的 NO 混合比扰动有很明显的准两年周期振荡的特征。以 30 km 为例, 从模拟第一年 1 月开始到模拟第二年 3 月, NO 混合比都是正扰动, 而从模拟第二年 3 月到模拟第三年 7 月, NO 混合比都是负扰动。接着, 模拟第三年 7 月到模拟第四年 8 月和模拟第五年 9 月到模拟第六年 10 月 NO 混合比都是正扰动, 模拟第四年 8 月到模拟第五年 9 月是负扰动。它的扰动周期约为 26 个月。振幅较大的扰动出现在 30~33 km, 可大于  $0.2 \times 10^{-9}$ ; 最大的扰动振幅在 31~32 km 附近, 一般可大于  $0.3 \times 10^{-9}$ , 扰动振幅极大值的位置随着时间向下传。从图 1a 可以看出由于 NO 的扰动向下传播, 导致了 NO 混合比扰动的上下反相或存在位相差。在 36 km 以上气层, NO 混合比扰动的准两年周期振荡并不明显, 而 25 km 以下气层 NO 混合比扰动的 QBO 振幅远小于 25~36 km 之间 NO 的 QBO 振幅。图 1b 是 NO<sub>2</sub> 混合比扰动的时间变化, 可以看出同样是在 25~36 km 气层, NO<sub>2</sub> 混合比扰动也有很明显的准两年周期振荡的特征。与 NO 相比, 它们有相同的扰动位相, 但是 NO<sub>2</sub> 有更大的扰

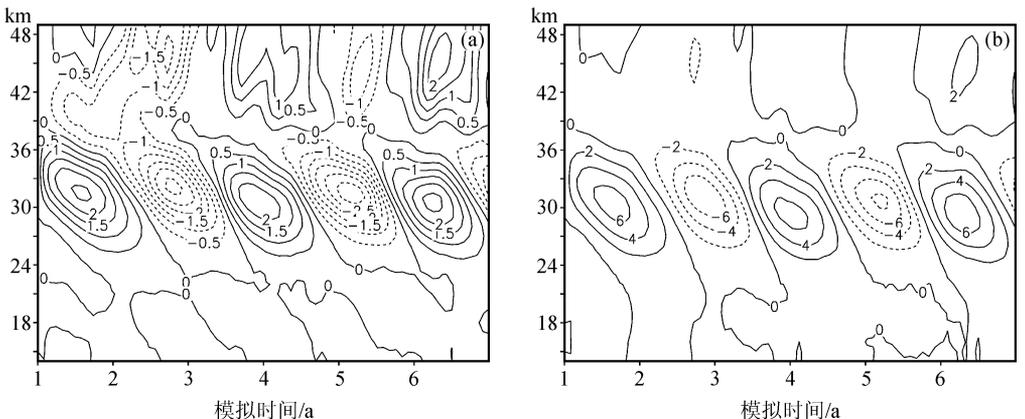


图 1 模拟的赤道上空 NO 混合比扰动 (a) 与 NO<sub>2</sub> 混合比扰动 (b) 垂直分布的时间变化 ( $\times 10^{-10}$ )

动振幅。在 28~31 km 的气层,  $\text{NO}_2$  扰动振幅一般大于  $0.6 \times 10^{-9}$ 。从图 1b 还可以看出,  $\text{NO}_2$  混合比扰动也是从上往下传, 并且在 25 km 以下气层和 36 km 以上气层  $\text{NO}_2$  混合比扰动的准两年周期振荡也不明显。

图 2 给出了模拟的 30 km 气层  $\text{NO}_x$  混合比扰动随时间的变化。从图 2a 可以看到, 30 km 气层的中纬和低纬的 NO 混合比扰动都有明显的准两年周期振荡。在热带, NO 混合比扰动振幅较大, 一般可大于  $0.2 \times 10^{-9}$ , 而在副热带, NO 混合比的扰动振幅则一般小于  $0.2 \times 10^{-9}$ 。此外, NO 混合比扰动在热带与副热带近似反位相, 并且这个反位相关系在热带与南半球副热带之间更明显, 这表明了  $\text{NO}_x$  混合比扰动的 QBO 相对于赤道并不完全对称。从图 2a 还可以看出, NO 混合比扰动是从赤道向两极发展, 一年约传播 30~40 个纬度。向北一般可发展至  $60^\circ\text{N}$ , 最远可到  $70^\circ\text{N}$ ; 向南发展可一直延伸到极地。图 2b 是  $\text{NO}_2$  在 30 km 气层混合比扰动随时间的变化。可以看到,  $\text{NO}_2$  混合比扰动分布与 NO 相似。在相同纬度,  $\text{NO}_2$  与 NO 混合比扰动有相同的位相, 但  $\text{NO}_2$  混合比的扰动振幅一般比 NO 大 2~3 倍。

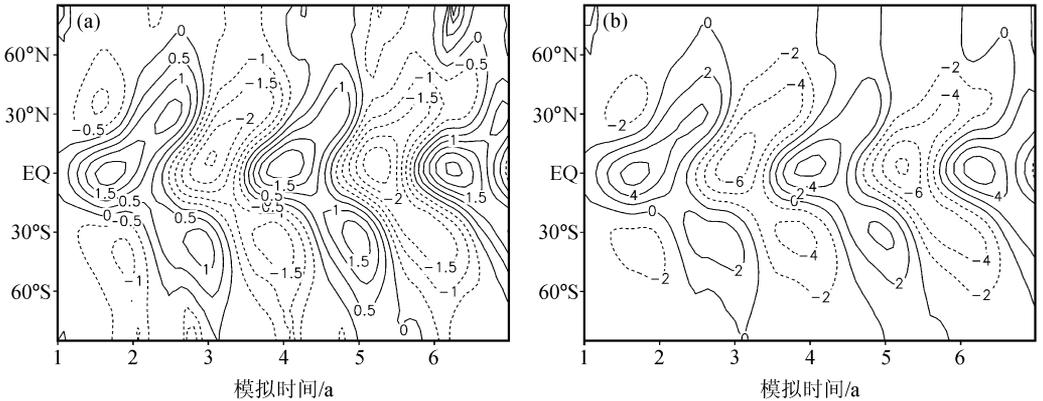


图 2 模拟的 30 km 气层 NO 混合比扰动 (a) 与  $\text{NO}_2$  混合比扰动 (b) 经向分布的时间变化 ( $\times 10^{-10}$ )

### 3.2 模拟和观测结果的比较

为了验证模拟结果, 我们将模拟的纬向风 QBO 引起的  $\text{NO}_x$  分布的准两年周期振荡与观测结果进行比较。图 3 为从 HALOE 资料分析的赤道上空纬向平均的  $\text{NO}_x$  混合比距平的高度分布随时间的变化。从图 3a 可以看出, 在 NO 混合比的极值高度 (1~2 hPa) 以下至 23 hPa 附近, NO 混合比的距平存在明显的准两年周期振荡, 并且在 6 hPa 以下, 还可以清楚的看到振荡向下传输。从图 3b 可以很明显地看出在赤道上空 50~1 hPa,  $\text{NO}_2$  混合比距平也有很强的准两年周期振荡, 而且与 NO 的振荡相同, 都是从上层向下传输。 $\text{NO}_2$  混合比距平在 15~5 hPa 的 QBO 信号比其上下方都强, 振幅可达  $0.4 \times 10^{-9}$  (甚至  $0.6 \times 10^{-9}$ ), 而它的上下方振幅一般在  $0.2 \times 10^{-9}$  左右。比较图 1 和图 3 可知, 上述观测资料分析的结果都与模拟的结果基本相同。

除了有以上相似之处外, 模拟结果与观测结果相比还有一些不同点。例如, 模拟的 NO 混合比的最大扰动振幅在 31~32 km 附近, 一般可大于  $0.3 \times 10^{-9}$ ; 而 HALOE 资料分析的 NO 混合比距平的最大振幅位置虽然与模拟结果相同, 但其最大振幅可达  $0.5 \times 10^{-9}$ 。此外, 模拟的 36 km (约 5 hPa) 以上气层  $\text{NO}_2$  混合比扰动的准两年周期振

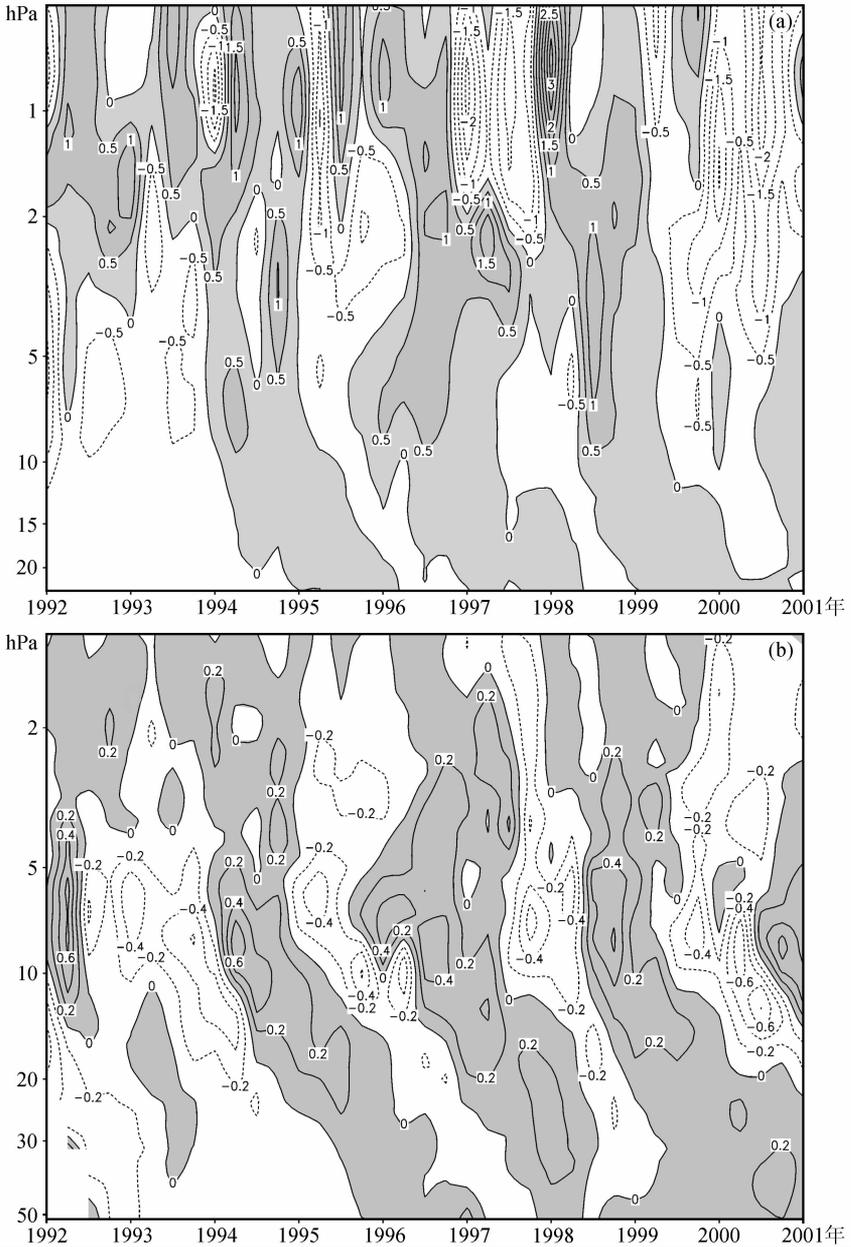


图3 赤道上空纬向平均的 NO (a) 和 NO<sub>2</sub> (b) 混合比距平的高度分布随时间的变化 ( $\times 10^{-9}$ )

荡不明显；而 HALOE 资料分析的 NO<sub>2</sub> 混合比距平的准两年周期振荡从 36~50 km (约 5~1 hPa) 都还是很明显的。

从上面的分析可以看出，纬向风 QBO 强迫是导致 NO<sub>x</sub> 混合比扰动有 QBO 特征的重要原因，特别是在 36 km 的下平流层。值得注意的是模拟和观测的不同之处，这说明除纬向风影响外，还有其他的影响因子，它们也影响着 NO<sub>x</sub> 的 QBO 分布。

### 3.3 NO<sub>x</sub>的准两年周期振荡形成机理探讨

图 4 是模拟试验中输入的纬向风扰动随时间的变化，它的扰动周期为 26 个月，最

大扰动振幅大于  $6 \text{ m s}^{-1}$ 。从图 4a 可以看到，赤道上空纬向风扰动大于  $2 \text{ m s}^{-1}$  的高度在 20 km 以上；图 4b 显示 30 km 气层纬向风扰动大于  $2 \text{ m s}^{-1}$  的范围在南北纬  $30^\circ$  之间。下面将讨论这种纬向风扰动如何造成  $\text{NO}_x$  的准两年周期振荡。

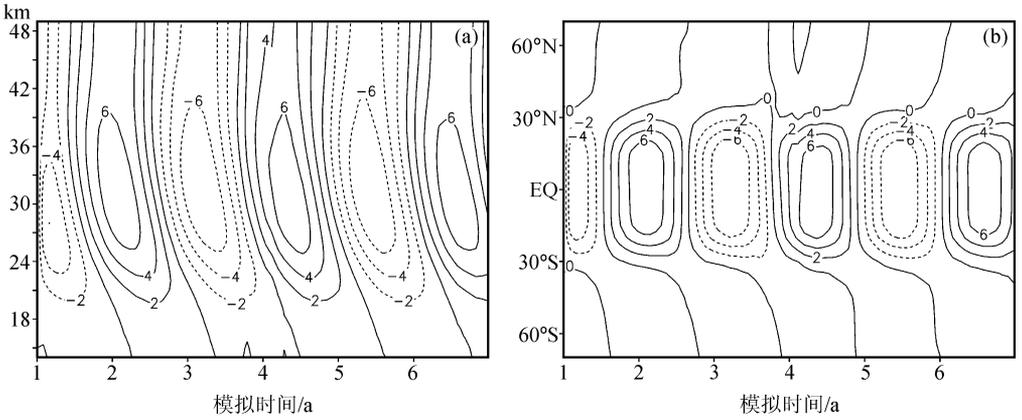


图 4 模拟的赤道上空 (a) 与 30 km 气层 (b) 纬向风扰动的时间变化 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ )

图 5a、b 分别是模拟第二年 7 月、模拟第三年 7 月风场的余差环流和未加风场 QBO 时模拟的  $\text{NO} + \text{NO}_2$  的分压场。图中的等值线为  $\text{NO} + \text{NO}_2$  的分压场，单位是  $10^{-8} \text{ hPa}$ ， $\text{NO} + \text{NO}_2$  分压的极值高度在热带约为 34 km，其值大于  $10.5 \times 10^{-8} \text{ hPa}$ ，可以看出  $\text{NO}_x$  含量高的地方在其混合比极值区的下方。图中的矢量线为经向风扰动和垂直风扰动形成的余差环流。从图 5 可清楚地看到，在平流层的上、中、下层各有一对相对于赤道基本对称的环流，冬半球略强（上层最明显），这个环流在赤道上空上升（或下降），在南北纬  $30^\circ$  附近下降（或上升），平流层中层的余差环流强度最强。图 6 a、b 分别是由余差环流输送引起的模拟第二年 7 月、模拟第三年 7 月  $\text{NO} + \text{NO}_2$  混合比扰动。

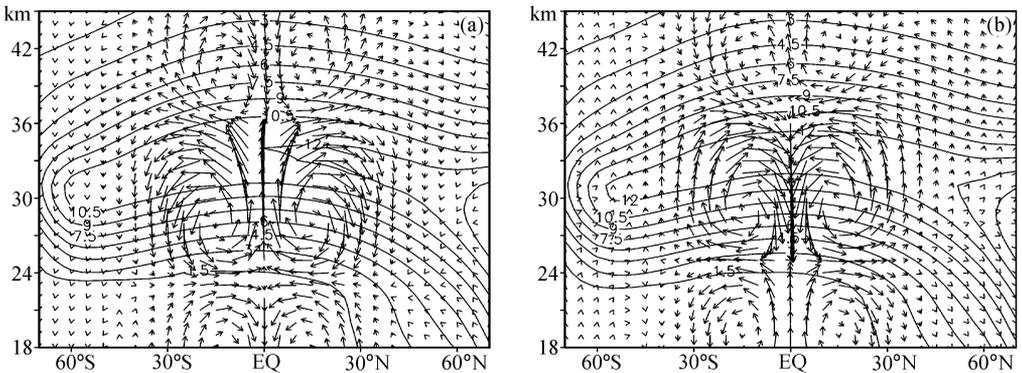
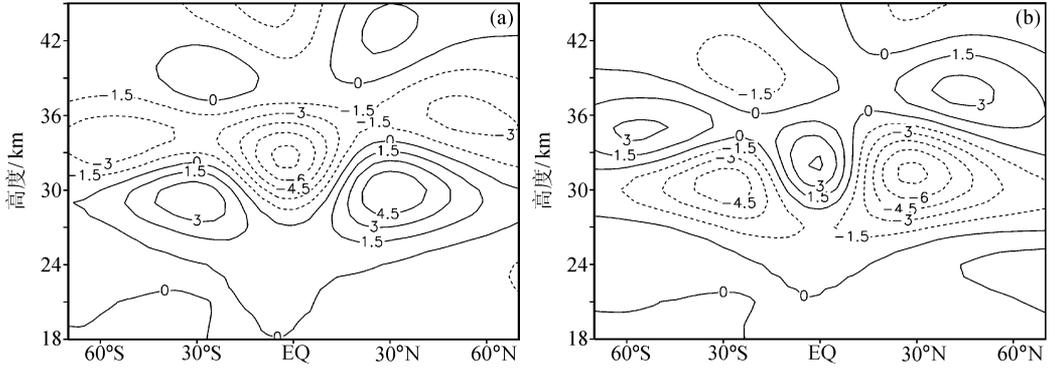


图 5 模拟的  $\text{NO} + \text{NO}_2$  分压场与余差环流  
(a) 第二年 7 月；(b) 第三年 7 月

从图 4 可知，图 5a 中模拟第二年 7 月的余差环流对应于纬向风场 QBO 的西风位相，在赤道上空 30 km 处是上升气流，它将下层  $\text{NO}_x$  含量小的空气向上输送，造成 30 km 处  $\text{NO}_x$  含量减少，分压下降。由于下层环流与中层环流相接在大约 23 km，所以向上输送的最小  $\text{NO}_x$  含量即在 23 km，其分压小于  $1.5 \times 10^{-8} \text{ hPa}$ 。赤道上空 30 km 处

图6 模拟的 NO+NO<sub>2</sub> 混合比扰动 ( $\times 10^{-10}$ )

(a) 第二年七月; (b) 第三年七月

NO<sub>x</sub>含量减小, 对应于图 6a 中的负扰动, 约为  $-4.5 \times 10^{-10}$ , 这与图 2 中 NO 和 NO<sub>2</sub> 在模拟年第二年七月赤道处的负扰动一致。而图 5a 中南北纬 30° 上空 30 km 处都是下沉气流, 它向此处输送了上层 NO<sub>x</sub> 含量大的空气, 使得南北纬 30° 上空 30 km 处的 NO<sub>x</sub> 含量增大, 形成了图 6b 中的正扰动, 对应于图 2 中模拟年第二年七月南北纬 30° 处的扰动正值。图 5b 中模拟年第三年七月的环流对应于风场 QBO 的东风位相, 可以看出这个环流系统与模拟年第二年七月的完全反向, 在赤道上空 30 km 处是下沉气流, 造成 30 km 上层 NO<sub>x</sub> 含量大的空气向下输送, 于是 30 km 处 NO<sub>x</sub> 含量增加, 如图 6b 中的正扰动, 对应于图 2 中模拟年第三年七月赤道处的正扰动。而图 5b 中南北纬 30° 上空 30 km 处都是上升气流, 它向此处输送了上层 NO<sub>x</sub> 含量小的空气, 使得南北纬 30° 上空 30 km 处的 NO<sub>x</sub> 含量减小, 造成了图 6b 中的负扰动, 对应于图 2 中模拟年第三年七月南北纬 30° 处的扰动负值。

从上面的分析可以看出, 在纬向风 QBO 强迫下, 由于经向风和垂直风场的扰动引起的余差环流 (特别是平流层中层的余差环流) 对 NO<sub>x</sub> 的输送, 造成局地 NO<sub>x</sub> 含量的扰动, 从而形成了 NO<sub>x</sub> 混合比的准两年周期振荡。因此, 在纬向风 QBO 强迫下产生的余差环流是 NO<sub>x</sub> 混合比准两年周期振荡形成的主要动力因素。

### 3.4 NO<sub>x</sub> 的准两年周期振荡与臭氧 QBO 的关系

图 7 为模拟的赤道上空臭氧混合比扰动的 QBO, 与 NO<sub>x</sub> 混合比扰动 QBO (图 1) 不同的是, O<sub>3</sub> 混合比扰动在 25 km 和 31 km 附近各有一个扰动中心, 而且上下层扰动中心的振荡位相差为 16~18 个月。NO<sub>x</sub> 只有一个扰动中心, 在 31 km 附近。上层的 O<sub>3</sub> 混合比扰动中心位置与 NO<sub>x</sub> 扰动中心位置一致, 但位相相反。这说明在 26~28 km (与季节有关) 以上, NO<sub>x</sub> 混合比扰动对臭氧混合比扰动起着重要的作用; 26~28 km 以下气层, 余差环流的输送对臭氧混合比扰动的作用是根本的。这与 Chipperfield 等<sup>[4]</sup> 和 Huang<sup>[5]</sup> 的结果似乎是一致的, 但是如果我们仔细分析一下由风场 QBO 引起的余差环流对 O<sub>3</sub> 的输送, 就会发现这结论不完全正确。

图 8a、b 分别为模拟第二年和第三年七月的余差环流和不加风场 QBO 时模拟的臭氧分压图 (单位:  $10^{-6}$  hPa), 图 9 a、b 对应于模拟第二年和第三年七月臭氧混合比的扰动。从图 8a 可以看到, 模拟第二年七月臭氧分压极大值位于 26 km 高度, 25°N 附

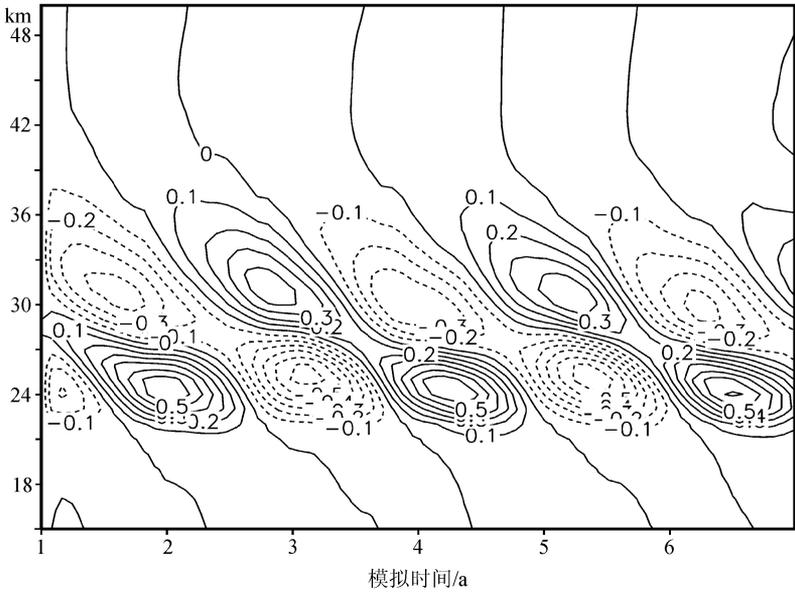


图7 模拟的赤道上空的臭氧混合比扰动的时间变化

近。它对应于纬向风 QBO 的西风位相，在赤道附近上空 25 km 到 36 km 之间的气层都是上升气流，它对臭氧的输送上面和下面有所不同，28 km 以上，它将臭氧含量大的空气向上输送，使得该处臭氧含量增大，而 25~28 km 附近，它将臭氧含量小的空气向上输送；在南北纬 30°附近，26 km 以上至 36 km 都是下沉气流，它将上层臭氧含量小的空气向下输送，造成该处臭氧含量减小。于是形成图 9a 中 26~36 km 气层 O<sub>3</sub> 混合比的扰动。对比 26~36 km 气层 NO<sub>x</sub> 混合比的分布（图 6a）可以看出，热带外地区 O<sub>3</sub> 混合比的扰动基本上与 NO<sub>x</sub> 混合比的扰动是反相变化的，在热带地区 29 km 以上二者也是反位相的。这表明，这些地区当风场 QBO 余差环流引起 O<sub>3</sub> 浓度减小（增加）时，同时引起 NO<sub>x</sub> 的混合比增加（减小），后者对 O<sub>3</sub> 的影响将使 O<sub>3</sub> 浓度进一步减小（增加）。东风位相时的情况与此相反，如图 8b、图 9b 和图 6b。也就是说，在上述区域附近，风场 QBO 引起的余差环流输送作用及其引起的 NO<sub>x</sub> 浓度的变化对 O<sub>3</sub> 浓度的影响

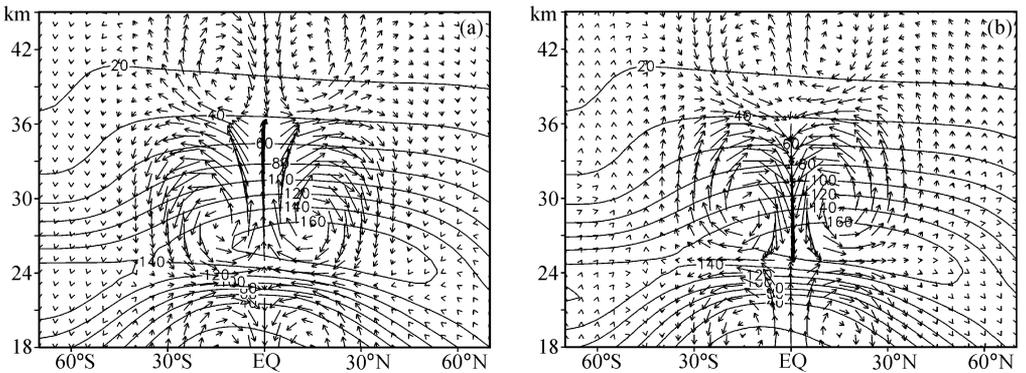


图8 模拟的臭氧分压场与余差环流  
(a) 第二年七月；(b) 第三年七月

是一致的。但在图 9a 中看出热带 O<sub>3</sub> 扰动在 26~29 km 扰动是负值, 与图 6a 的 NO<sub>x</sub> 扰动位相并不相反, 如上所述, 这是由风场的输送引起的。由此可见, 在热带上空 26~29 km, 风场对臭氧的作用比 NO<sub>x</sub> 的作用更重要。在 24 km 以下, 热带有下沉气流, 将臭氧含量大的空气向下输送, 而在南北纬 30° 附近有上升气流, 它将臭氧含量小的空气向上输送。从图 9a 可以看出, 24 km 以下气层, 在赤道和中低纬臭氧扰动都与余差环流作用一致, 而在赤道上空 NO<sub>x</sub> 浓度增大, 在热带外地区 NO<sub>x</sub> 减小, 它们对 O<sub>3</sub> 的破坏作用与余差环流的输送作用相反。但是由于这气层中 NO<sub>x</sub> 扰动的幅度不大。所以它们对 O<sub>3</sub> 的破坏作用并不大, 而使余差环流的输送起重要作用。对于模拟第三年 7 月, 即图 8b、图 9b 和图 6b 的分析也有如上的类似情况。

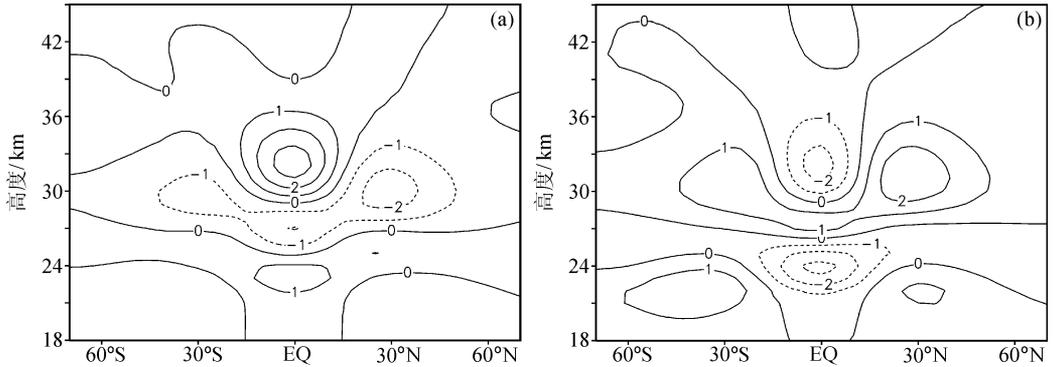


图 9 模拟的臭氧混合比扰动 ( $\times 10^{-7}$ )

(a) 第二年 7 月; (b) 第三年 7 月

同样, 我们分析了模拟第三年 1 月臭氧分压和风场余差环流及臭氧 NO<sub>x</sub> 混合比扰动, 发现在 28 km 以下, 余差环流的输送作用与臭氧混合比扰动一致, 而 NO<sub>x</sub> 扰动作用不明显; 热带 28~32 km 之间, 余差环流的输送与 NO<sub>x</sub> 扰动对臭氧的作用一致; 在热带 32~36 km 之间, 余差环流的输送和 NO<sub>x</sub> 扰动作用与臭氧扰动一致 (图略)。

从以上分析可以看出, 对于臭氧 QBO 的形成, 风场 QBO 引起的余差环流的输送和由它引起的 NO<sub>x</sub> 的扰动都是重要的因素, 但在不同高度上其重要性不同。例如在 26 km (7 月) 或 28 km (1 月) 以下的平流层下层, 风场 QBO 引起的余差环流的输送作用是主要的, 而 NO<sub>x</sub> 的扰动则不重要; 28 km 以上, 余差环流和 NO<sub>x</sub> 扰动起着同样的作用, 特别是在 28~35 km 气层, 由于余差环流圈很强, 无论在赤道上空还是在热带外地区垂直运动的变化都很大, 使得 NO<sub>x</sub> 的准两年周期振荡也较强, 它们在臭氧 QBO 的形成中的作用都是不可低估的。

## 4 结论

在前面主要分析了模拟的 6 年平均的四季平流层 NO<sub>x</sub> 混合比的垂直分布及其准两年周期振荡的特征, 并与 O<sub>3</sub> 的准两年周期振荡进行对比, 得出了以下几点结论:

(1) 模拟的平流层 NO<sub>x</sub> 浓度的垂直经向分布, 从某一气层开始向上增大, 达到极值高度后, 开始减小。NO 的高值区分布在 40~45 km 附近, 比 HALOE 观测结果略

偏低, 并且高值中心的位置有明显的季节变化和两年周期变化;  $\text{NO}_2$  混合比的极值位于平流层 35~40 km, 接近臭氧的峰值区位置, 与 HALOE 观测结果相同。

(2) 在风场扰动的 QBO 强迫下,  $\text{NO}_x$  在中低纬的高度分布和经向分布上的确存在准两年周期振荡。 $\text{NO}_2$  有比  $\text{NO}$  更大的扰动振幅, 而且  $\text{NO}_x$  的 QBO 不完全相对于赤道对称。在赤道上空 25~36 km,  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  混合比有相同的扰动位相; 与  $\text{O}_3$  混合比扰动相比, 28 km 以下, 它们是同位相的, 而 28 km 以上, 它们的扰动位相则相反。

(3) 风场 QBO 扰动形成的余差环流对  $\text{NO}_x$  的输送是它们存在准两年周期振荡的主要原因。

(4) 在 28~29 km (与季节有关) 以下的平流层, 风场 QBO 引起的余差环流对  $\text{O}_3$  的输送是臭氧 QBO 的主要形成原因, 而 29 km 以上, 风场 QBO 引起的余差环流对  $\text{O}_3$  的输送和余差环流引起的  $\text{NO}_x$  的 QBO 对臭氧 QBO 的形成起同样的作用, 特别是在 28~35 km 气层, 由于余差环流圈很强。无论在赤道上空还是在热带外地区垂直运动的变化都很大, 使得  $\text{NO}_x$  的准两年周期振荡也较强, 它们在臭氧 QBO 的形成中的作用都是不可低估的。

致谢: 感谢 NCAR 提供包含化学、辐射、动力相互作用的二维模式。

## 参 考 文 献

- 1 G. 布拉塞、S. 索洛蒙, 黄润恒译, 中层大气化学和物理学, 北京: 气象出版社, 1988, 第五章第五节、第九节.
- 2 王贵勤, 大气臭氧层研究简介, 北京: 气象出版社, 1990, 21~25.
- 3 Jones, D. B. A., H. R. Schneider, and M. B. McElroy, Effects of the quasi-biennial oscillation on the zonally averaged transport of tracers, *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**, 11235~11249.
- 4 Chipperfield, M. P., L. J. Kinnersley, and J. Zawodny, A two-dimensional model study of the QBO signal in SAGE II  $\text{NO}_2$  and  $\text{O}_3$ , *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**, 589~592.
- 5 Huang, T. Y. W., The impact of solar radiation on the quasi-biennial oscillation of ozone in the tropical stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23** (22), 3211~3214.
- 6 张弘、陈月娟、吴北婴, 准两年振荡对大气中微量气体分布的影响, 大气科学, 2000, **24** (1), 103~110.
- 7 郑彬、陈月娟、简俊,  $\text{NO}_x$  的准两年周期变化及其与臭氧准两年周期振荡的关系 I. 资料分析, 大气科学, 2003, **27** (5), 821~833.
- 8 Huang, T. et al., Description of socrates, a chemical, dynamical, radiative 2-D model, Technical Report, NCAR, Boulder, Colorado, 1997.

# Quasi-Biennial Oscillation in NO<sub>x</sub> and Relationship to O<sub>3</sub> QBO

## Part II. Numerical Experiment

Zheng Bin, Chen Yuejuan, and Zhang Hong

(*School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

**Abstract** The NCAR interactive chemical, dynamical and radiative two-dimensional model is used to study the impact of the quasi-biennial oscillation (QBO) in zonal wind on the distribution of the stratospheric tracer gases. In the model, the zonal wind QBO is input to calculate the vertical meridional distribution of NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> and the meteorological elements, and compared with the results simulated without wind QBO forcing. Based on the HALOE data analysis of the part I of our paper, we explored the variation of the NO<sub>x</sub> vertical distribution and NO<sub>x</sub> QBO under the impact of wind QBO further more, which is then compared with O<sub>3</sub> QBO. The results indicate that the simulated distributions of six-year averaged NO<sub>x</sub> mixing ratio are almost consistent with the distributions of the observational NO<sub>x</sub>, and the QBO in the turbulence of NO<sub>x</sub> mixing ratio is obvious under the zonal wind QBO forcing; NO<sub>x</sub> QBO is in phase with O<sub>3</sub> QBO above the 28km altitude and out of phase under the altitude, which is consistent with the results of the HALOE observation. Deeper analysis on the simulated residual circulation induced by zonal wind QBO is done to discuss the relative essentiality of transport of residual circulation and destruction induced by NO<sub>x</sub> in the formation of O<sub>3</sub> QBO in different altitude layer.

**Key words:** two-dimensional model; nitrogen oxides; ozone; quasi-biennial oscillation