

北半球中层大气中 NO_x 的 垂直分布特征*

简俊 陈月娟 郑彬

(中国科学技术大学地球与空间科学系, 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)

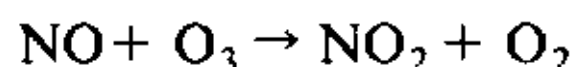
摘要 对 UARS 卫星 1992、1993、1994、1995、1996、1998 年夏季的 HALOE 观测资料分别进行客观分析, 把卫星观测资料插值到 $5^\circ \times 5^\circ$ 的网格点上。并分别做了 30°N 和 40°N 多年平均 NO_2 和 NO 混合比的垂直剖面分析, 各年同纬度不同经度及同经度不同纬度处 NO 和 NO_2 混合比的垂直分布特征分析。结果表明 NO 混合比含量在 1 hPa 和 1×10^{-5} hPa 高度处有两个峰值, 0.1 hPa 处是一个极小值, 50 hPa 到 0.3 hPa 之间 NO 混合比含量非常稳定, 而 0.1 hPa 以上 NO 含量向上增长。在热层中的 NO 混合比分布有一定起伏。 NO_2 混合比含量在 100 hPa 及 0.5 hPa 高度处是极小值, 从 5 hPa 到 10 hPa 则为最大值。但 100 hPa 以下进入对流层后含量急剧增加, 往往会超过 10^{-8} 。在平流层中 NO_2 分布廓线基本吻合, 同纬度不同经度极值出现的位置变化不大, 但不同纬度极值的位置有一定差异, 低纬区极值位置偏高。在中层大气中 NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) 和 O_3 具有非常相似的分布特征, 尤其在平流层, 它们几乎在同一高度达到极值, 说明它们之间有非常密切的联系。

关键词: 氮氧化物; 垂直分布; HALOE 观测资料

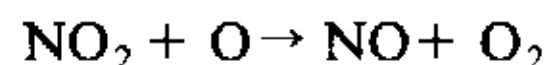
1 前言

大气中所含的各种温室气体及气溶胶粒子对人类生活环境的影响一直是大家密切关注的课题之一。近年来随着探测手段的进步, 研究各种微量气体的分布特征及它们在大气层中所扮演的角色有了更大的可能。随着 20 世纪 80 年代地球南北两极臭氧洞的发现, 人类活动与平流层臭氧减少之间的联系愈来愈受全球瞩目, 这要求我们不仅要重视臭氧的分布变化, 也要重视与之相互关联的微量气体的探测及研究。

在平流层臭氧光化学反应过程中, 氧化氮起着重要的作用。其中化学反应



直接破坏臭氧, 而另一个反应



不仅使大气中氧原子减少, 不利于臭氧分子形成, 同时还产生 NO , 进一步破坏臭氧分

2000-05-24 收到, 2000-07-11 收到修改稿

* 国家杰出青年科学基金 49525508 和中国科技大学高等研究院共同资助

子。另一方面,平流层 NO_2 还可以光化分解为 NO 和氧原子。因此,了解它们的分布状况对研究臭氧的分布和变化非常重要。

高层大气中的氮氧化物主要是由激发态或基态的氮原子和氧分子快速反应形成的。大气中的氮分子在太阳辐射或宇宙射线中高能粒子作用下分解,生成两个激发态的氮原子,进而生成氮氧化物。低层大气中的氮氧化物主要来自生物排放、人类活动、工业生产等。在热带地区,因为农业,大片的森林和草原被烧毁。燃烧中产生许多种化学物质,如 CO_2 、 CO 、 H_2 、 N_2O 、 NO 、 COS 和 CH_3Cl ,这些成分一部分最终会到达中层大气。现代农业中氮肥的广泛使用,也已经改变了氮元素的自然循环。工业排放、飞机废气、核爆炸对氮氧化物的影响也不能忽略^[1]。所以,早在 20 世纪 70 年代,就有学者开始了对 NO 和 NO_2 的观测,并且给出了北半球中纬度 NO 和 NO_2 的垂直分布廓线^[1]。然而,他们对 NO 和 NO_2 的观测资料主要是地面零散的光谱遥感值,而且观测高度也只是在 60 km 以下,对于研究中层大气中臭氧的光化过程是很不够的。于 1991 年 9 月发射的高层大气研究卫星 (UARS) 中有一个称为卤素掩星实验 (Halogen Occultation Experiment, 简称 HALOE) 的装置,它可以测量从 5 km 到 60~130 km 高度范围内的 HF 、 CH_4 、 HCl 、 O_3 、 NO_x 、 H_2O 等气体的垂直廓线和气溶胶的消光系数。HALOE 资料经过多年的运行并与已有的陆基探空资料对比,结果相当吻合。在 Russell 等的文章^[2]中,除介绍了 HALOE 的观测原理之外,还给出了 1992 年 1 月 29 日在 20°N 和 5 月 7 日在 34°N HALOE 的观测结果 (包括在日出和日落时观测到的 HF 、 HCl 、 O_3 、 H_2O 、 CH_4 、 NO 和 NO_2 的混合比的垂直廓线以及日落时观测到的这几种元素的经向垂直剖面图)。从他们给出的图中可以看出在同一天中,日出与日落时间观测到的 NO_x 混合比的垂直廓线很相似,只是其值有所不同。在平流层中, NO 和 NO_2 的混合比日出时的值小于日落时的值。这主要是因为日落时观测到的 NO_x 经过了一天的光化反应,而日出时观测到的则是经过了一夜没有太阳照射的结果。1993 年 Luo 等^[3]对 1991 年 11 月 8~9 日发生强磁暴时 HALOE 观测到的中层大气的 NO 混合比含量进行量化分析,指出在此期间 51°N 上空 NO 日出时的混合比含量有较大的增加,且增加量沿纬向对称,最大值出现在地磁极附近。1998 年, Nedoluha 等用 HALOE 资料分析了 1992 年到 1997 年 NO_2 的变化情况,发现在赤道附近地区平流层下层 NO_2 有所增加^[4]。在对 HALOE 和其他观测数据进行分析的同时,近几年也有一些学者分别用零维箱型模式 (Zero-dimensional box model)^[5]或二维模式^[4,6]来模拟平流层 NO_2 或 NO_y 的分布,并与 HALOE 或 ATOMS 资料对比,发现这些模式都在平流层上层高估了 NO_y 的含量,而在平流层下层,在 23°N 附近的模拟结果与观测资料比较符合,在赤道附近模式对 NO_y 的估计约低 50% 左右。以上研究工作,或者只是给出某时刻某个地点的 NO_x 的垂直分布的变化,或者用模式研究 NO_x 的含量,而很少研究 NO 和 NO_2 垂直分布特征的多年平均状况和地域分布差异。本文正是利用 1992~1998 年的 HALOE 资料来分析中层大气中氮氧化物的垂直分布特征,由于资料较多,我们主要讨论夏季的情况。

2 HALOE 资料简介

UARS 是极轨卫星,轨道离地面 585 km。卤素掩星实验是利用当某地太阳升起或

降落的瞬间, 太阳-卫星之间连线正巧与该地相切时, 用探测仪记录接受到的太阳辐射, 比较通过此地上空的太阳辐射与通过真空的太阳辐射, 就可以反演出该地上空各微量气体的混合比。因为日地连线并不能保证总与卫星轨道平行, 所以掩星实验对地球某一地区观测在时间上不连续, 对地球也不是定点观测。HALOE 是一个八通道太阳辐射计, 提供的资料其纬向测量范围为 $80^\circ\text{S} \sim 80^\circ\text{N}$, 它的垂直分辨率很高, 从地表面到 10^{-6} hPa, 共有 271 层, 在 100 km 以下各层垂直间距大约为 400 m, 100 km 以上各层垂直间距逐渐增大, 到 140 km 高度附近各层垂直间距约为 1.5 km。不同气体其观测高度范围不完全相同, NO 的观测范围从 6~125 km, NO_2 的观测范围是 5~45 km^[2]。本文使用的 HALOE 资料是从网上下载的 1992~1998 年的氮氧化物观测资料 (<http://haloedata.larc.nasa.gov>)。由于 HALOE 实验对地球不可能定点地连续进行观测, 不同年份的相同季节里, HALOE 资料水平覆盖区域和给出资料的确切地点稍有不同。为了便于分析和比较, 我们首先对 1992、1993、1994、1995、1996、1998 年夏季日出时的观测资料 (1997 年夏季 HALOE 无日出观测资料) 分别进行客观分析, 把卫星观测资料插值到 $5^\circ \times 5^\circ$ 的网格点上。然后再进行其垂直分布的分析。

3 资料分析结果

利用上述 $5^\circ \times 5^\circ$ 网格点上的资料, 我们分别做了 30°N 和 40°N 多年平均 NO_2 和 NO 的垂直剖面分析, 沿 35°N 不同经度及沿 110°E 不同纬度的 NO 和 NO_2 的垂直分布特征分析, 结果如下。

3.1 夏季 NO 混合比的垂直分布特征

图 1 是 1992~1996 年和 1998 年共 6 年纬向平均的夏季 6~8 月份 35°N NO 对数混合比-气压分布图, 可以得出 NO 垂直分布所具有的一般特性: 200 hPa 附近 NO 混合比小于 1×10^{-11} , 200 hPa 以上逐渐增加, 到 1 hPa 高度达到极大值 1×10^{-8} 左右, 随后又逐渐减小, 在 0.1 hPa 附近达到极小值。从 0.1 hPa 到 1×10^{-6} hPa 这一段里 NO 混合比又呈递增分布, 直到在 2×10^{-6} hPa 附近达到最大值 3×10^{-4} 左右。这同 Russell 等^[2]给出的 1992 年 1 月 29 日在 20°N 和 5 月 7 日在 34°N 的 NO 混合比的垂直分布特征是一致的。我们的结果在 1 hPa 到 100 hPa 之间的分布与 20 世纪 70 年代 Loewenstein 等人的观测结果^[1]也是相符的。

对各年夏季同纬度不同经度 NO 混合比的垂直分布进行分析, 我们看到各年夏季 NO 的垂直分布与图 1 非常相似, 下面以 1995 年为例予以讨论。图 2 给出的是 1995 年夏季 35°N 处 90°E 和 110°E (中国大陆)、 180° (太平洋中部) 和 110°W (北美中部) 的 NO 对数混合比-气压分布图, 与图 1 的多年、纬向平均分布图比较, 可以看出 1995 年的 NO 垂直廓线与平均值廓线形状基本相同, 只在 300 hPa 以下有一定差别。比较图 2 中不同经度 NO 混合比含量, 可以看出在 100~1 hPa 气层中它们的 NO 垂直分布廓线基本重合, 从 0.1 hPa 往上不同经度的垂直廓线呈波动起伏, 几乎没有完全重合的部分, 但增长的趋势相同, 峰值出现的位置也大体上相同, 只是数值有所变化。100 hPa 以下也有类似情况, NO 垂直分布持续减少, 廓线形状相似但不重合。

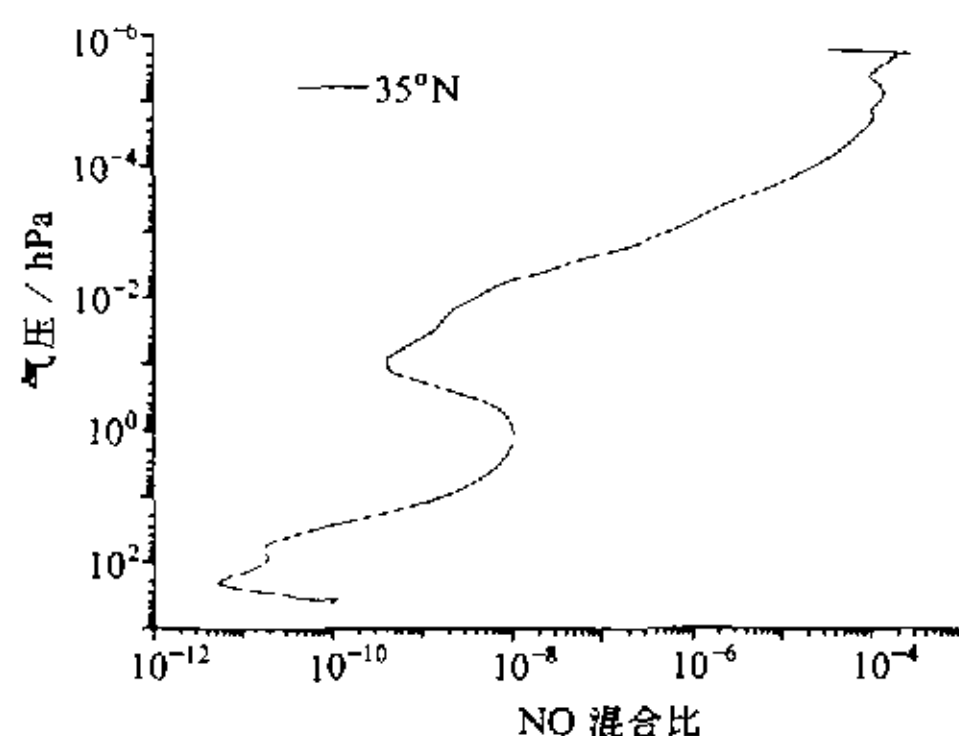


图 1 35°N 6 年 (1992~1996、1998 年) 纬向平均 NO 对数混合比

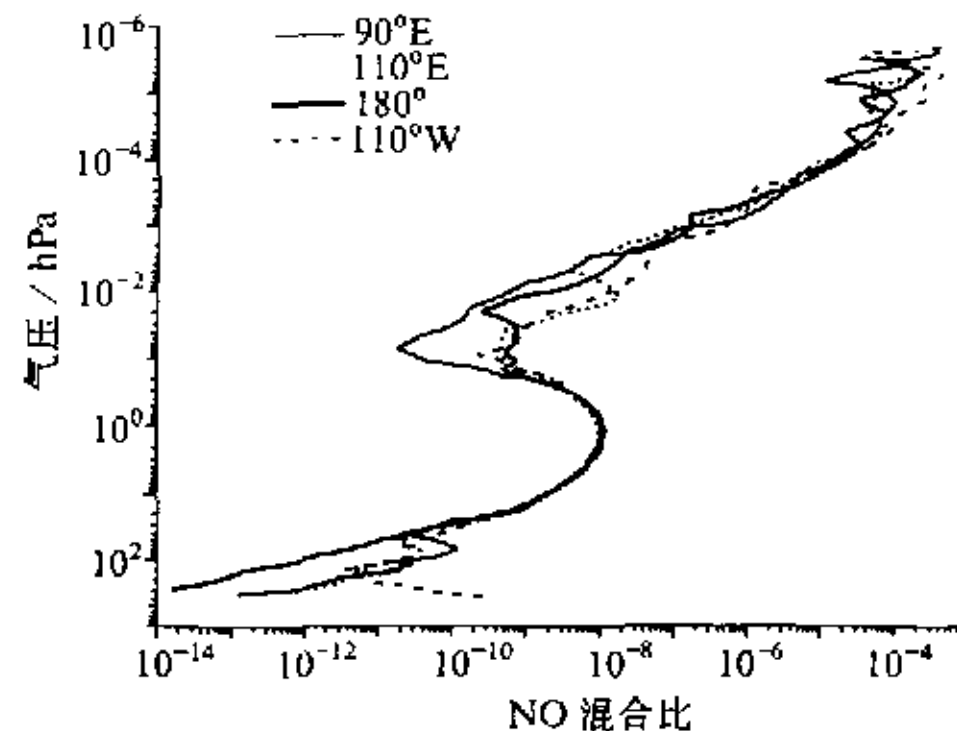


图 2 1995 年 35°N 不同经度 NO 对数混合比

图 3 给出的是 1995 年夏季 110°E 处不同纬度的 NO 对数混合比-气压分布图, 它的基本特征与图 1、图 2 的大体相同, 特别是在平流层 50 hPa 到 0.5 hPa 之间垂直分布非常相似, 只是数值上稍有差异, 在 0.2 hPa 到 0.01 hPa 气层附近没有出现明显的最小值。下面我们来看看相同地点, 不同时间的 NO 对数混合比垂直分布比较, 图 4 是同一地点 (35°N, 100°E) 三年里 (1992、1993、1994) 夏季的 NO 对数混合比垂直廓线。从对流层顶到热层, 只有 10 hPa 到 0.5 hPa 处于平流层中部的这一段廓线重合得很好, 甚至连峰值的位置、量级都非常吻合。在 10 hPa 到对流层顶及 0.3 hPa 到 1×10^{-5} hPa, 不同年份的廓线一般不重合, 起伏的幅度也较图 2 中相同纬度不同经度的廓线要大, 其中从 0.1 hPa 到 0.01 hPa 之间不同年份的 NO 混合比相差可以达到 3 个量级, 说明在这个气层中, NO 浓度很不稳定。

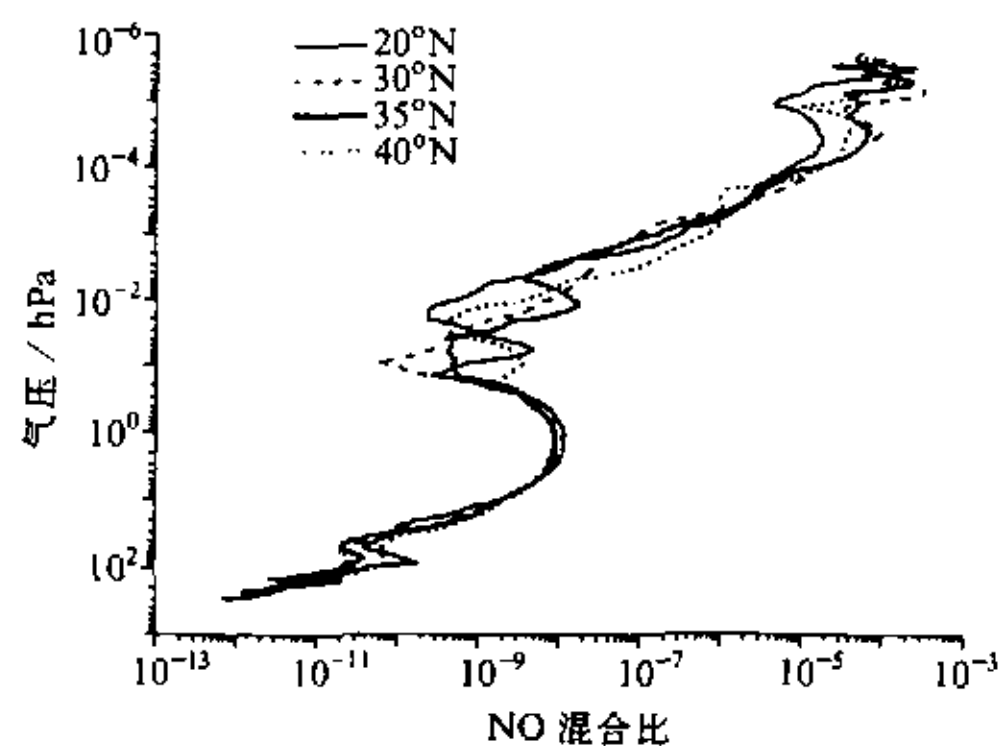


图 3 1995 年 110°E 处不同纬度 NO 对数混合比

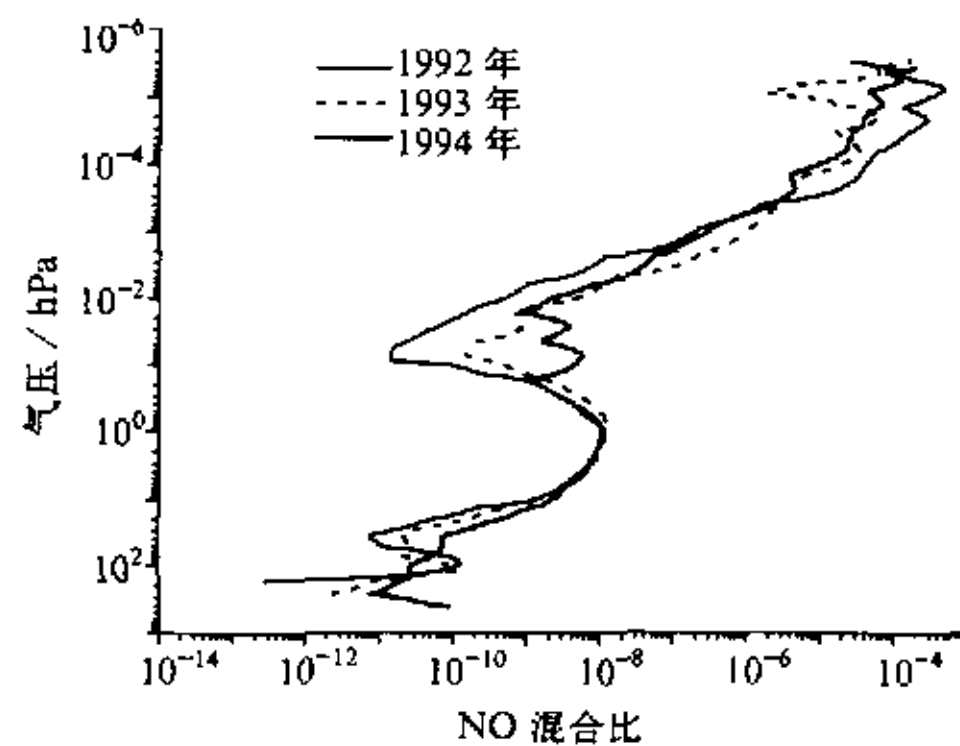
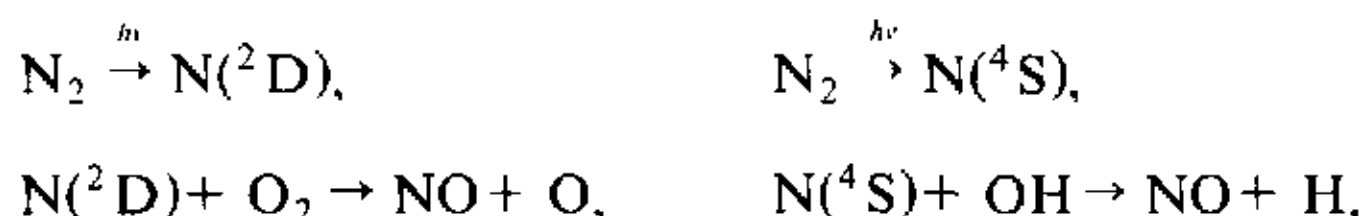


图 4 1992、1993、1994 年 (35°N, 100°E) 处 NO 对数混合比

图 5 为沿纬度 30°N 6 年平均的 NO 对数混合比的经度-高度剖面图, 图中明显可看出在 1 hPa 附近的 1×10^{-8} 及 10 hPa 附近的 1×10^{-10} 等值线几乎平行, 这和图 2、3、4 中不同的垂直廓线在平流层重合最好是一致的。同样, 在垂直分布图中起伏较大

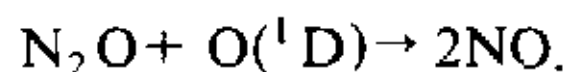
的区间在图 5 中也可找到对应的部分。如 0.01 hPa 气层附近等值线有一定起伏。而 1×10^{-4} hPa 气层以上 NO 混合比虽然都是明显增大, 但各经度区域有不小差异, 无明显规律, 扰动很大, 在多处出现了极值, 虽然经过 6 年的平均也没有使曲线平滑。之所以会出现这样的现象, 是因为 1×10^{-4} hPa 以上气层已到达中间层上部和热层。

在中间层上部及热层, 很容易受到太阳辐射及宇宙高能粒子作用而发生如下反应:



生成 NO。由于 HALOE 资料并不是定点定时观测, 我们只能选取有限的资料进行客观分析。这几个资料的观测时刻不一定都处在太阳黑子活动周期的同一阶段, 而宇宙射线的作用无明显时间规律可循。但太阳辐射和高能粒子对高层大气分子的作用随气层高度下降而减小, 因此从中间层向上 NO 混合比含量还是保持相同的增长趋势。 1×10^{-4} hPa 气层以上大气层中光化学作用剧烈, 又处于异质层, 对流活动旺盛, 即使在同一天里, NO 混合比也有可能在不同高度出现极大值, 不同纬度、经度、年份之间的差别就更大了。

由前面分析可知, 即使在不同年份的同一季节里, 中层大气下部中的 NO 混合比垂直分布仍几乎不变。这主要是由于此区域大部分处于平流层, 而平流层中的 NO 几乎都是由 N_2O 通过与氧原子的激发态发生反应而离解产生的,



N_2O 主要是通过土壤的复杂的氮化和消氮化机制相联系的细菌过程而产生的, 因此在对流层广泛存在并注入到平流层下部^[3]。但平流层中对流活动很少, N_2O 及生成的 NO 分子也很难有强烈的垂直扩散。因此在很长一段时间里不同地区的 NO 的光化生成和光化离解保持稳定的平衡, 含量基本不变。此外, 平流层离电离层较远, 电离层中稀薄气体受到宇宙射线激发而产生的 NO 分子也不太容易扩散到这一区域。只有在强太阳质子事件的几天里穿透到平流层的大量质子才足以产生有影响的 NO 分子^[3]。平时中纬度地区由宇宙射线作用而产生的 NO 可以忽略不计。在图 4 中还可以看出 100 hPa 以下不同年份 NO 混合比含量有较大差别, 这一方面是由于不同时期云层和气溶胶对太阳辐射的衰减作用不同, 另一方面是由于不同年份对流层中对流活动不尽相同, 从下层输送上来的 N_2O 含量不一样, 所以在 100 hPa 以下的气层中不同年份 NO 的光化生成和光化离解会有较大差异。

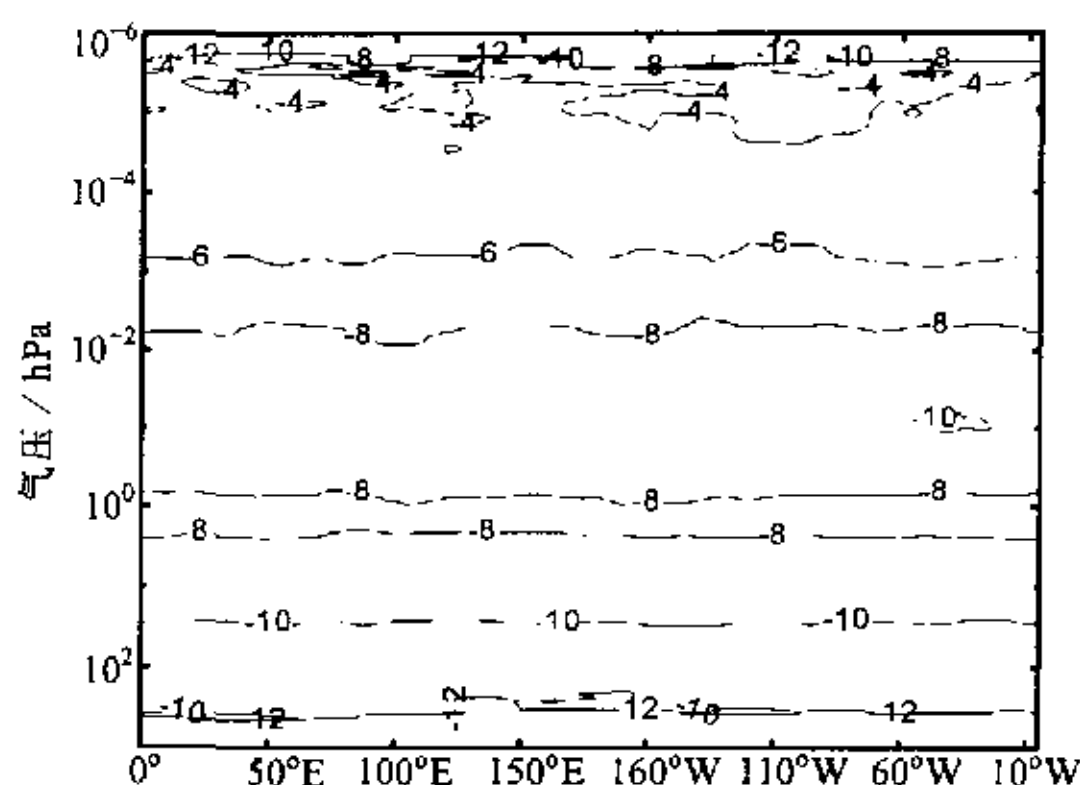


图 5 6 年平均 NO 对数混合比 30°N 纬向剖面

3.2 夏季 NO_2 混合比的垂直分布特征

图 6 是 1992~1996 年及 1998 年 6 年纬向平均的 NO_2 混合比含量—气压垂直分布图, 可以看出 NO_2 垂直分布的一般特征: 除在对流层有大浓度的 NO_2 以外, 在平流层

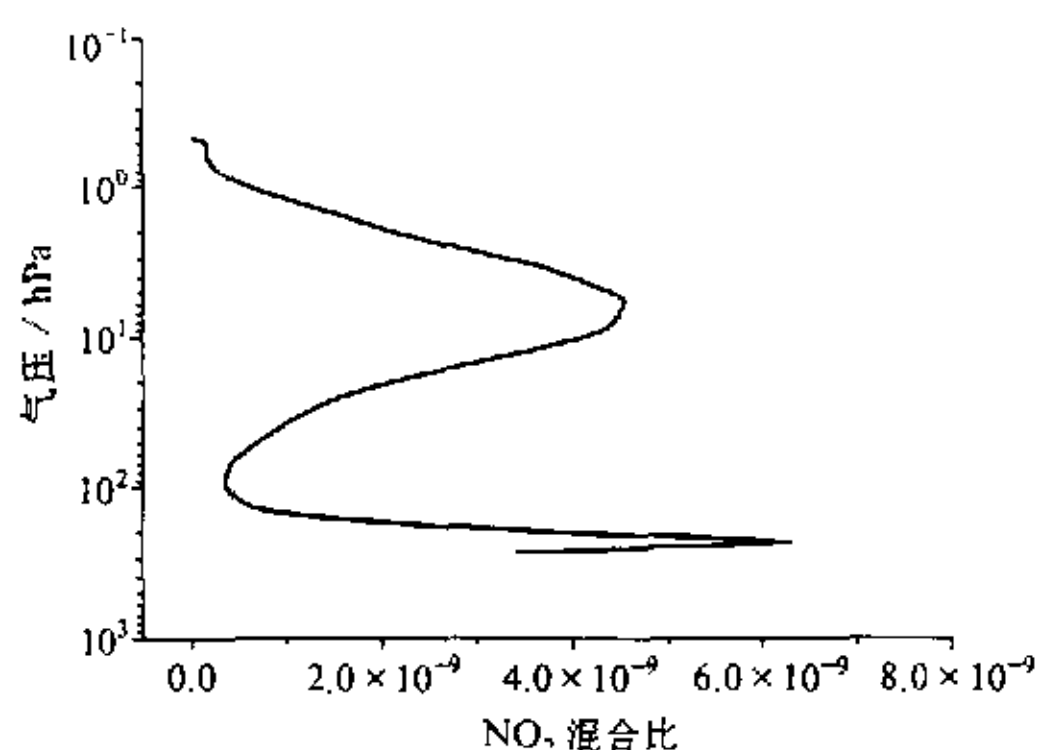


图 6 35°N 6 年 (1992~1996、1998 年) 纬向平均 NO_2 混合比

中部有一个 NO_2 的高浓度区, 约在 20~2 hPa 气层中。在 6 hPa 附近 NO_2 混合比极值达到 4.5×10^{-9} 。在对流层顶(100 hPa)附近 NO_2 浓度很小, 在平流层顶(1 hPa)以上, NO_2 混合比几乎为零。这一分布特征与 Russell 等^[2]给出的 NO_2 混合比的垂直分布特征一致。我们的结果在 1 hPa 到 100 hPa 之间的分布与 20 世纪 70 年代 Drummond 等人的观测结果^[1]也是相符的。

图 7 给出的是 1995 年夏季 35°N 处 90°E 和 110°E (中国大陆)、180° (太平洋中部) 和 110°W (北美中部) 的 NO_2 混合比—气压分布图, 与图 6 相比, 1995 年的 NO_2 垂直廓线与平均值廓线形状大体相同。比较图 7 中相同纬度不同经度 NO_2 混合比含量, 在大部分气层里 NO_2 增长的趋势相同, 峰值出现的位置也大体上相同, 不同经度的垂直廓线呈波动起伏, 但一般相差不超过 5%, 差别最大的区间是在 100 hPa 以下的对流层顶。HALOE 资料对 NO_2 气体的探测区间主要集中在平流层内, 和这一区间的 NO 气体垂直分布相比 (图 3、图 4), NO_2 垂直廓线几乎没有完全重合的部分。

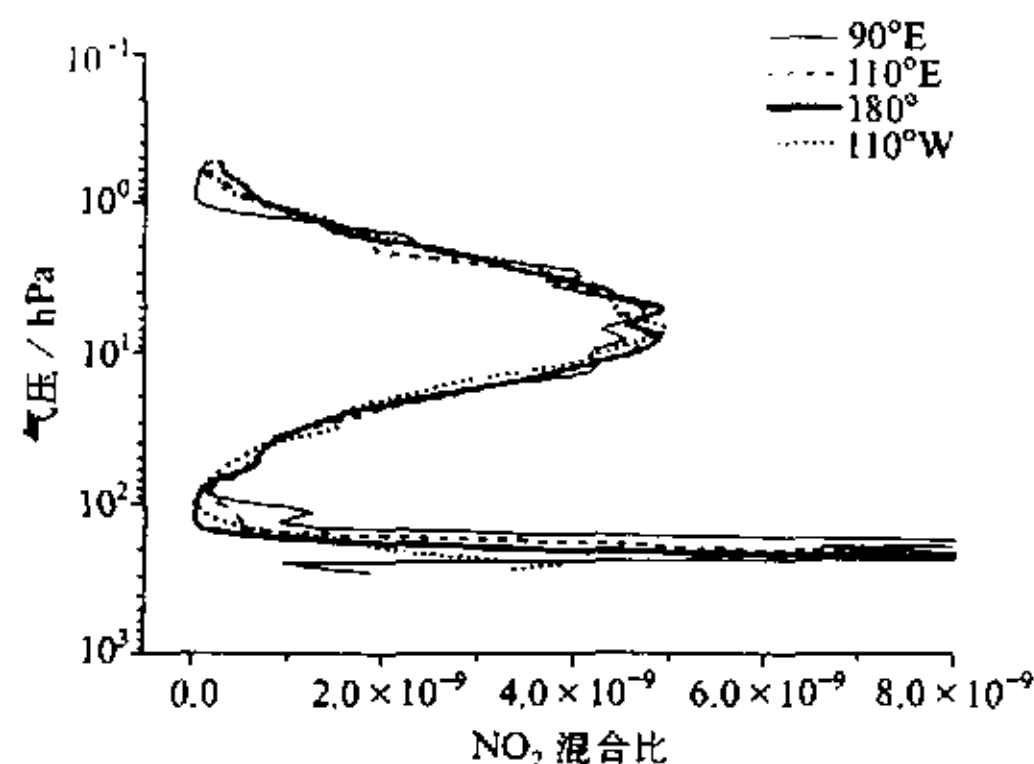


图 7 1995 年沿 35°N 不同经度处 NO_2 对数混合比

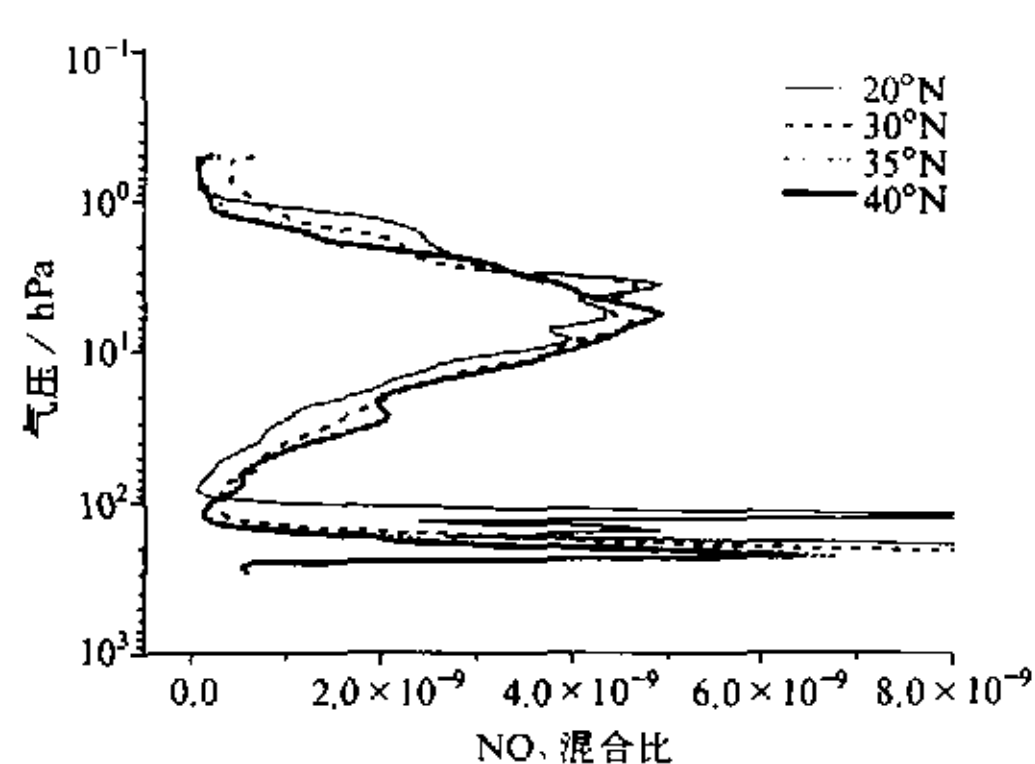


图 8 1996 年沿 110°E 不同纬度处 NO_2 混合比

图 8 给出的是 1996 年夏季 110°E 处 NO_2 混合比—气压分布图, 除了图 6、图 7 已有的基本特征外, 明显可知在相同经度下, 不同纬度的 NO_2 垂直廓线之间相差较大。一般而言, 其极值大小相差不大, 主要是极值的位置, 低纬度其极值位置较高。因此, 在同一高度上 NO_2 浓度差异就比较大。在平流层中部相差有 25%, 对流层区域内 NO_2 混合比含量最高可超过 1×10^{-8} , 在同一气层里的差别也可超过 50%。图 9 是同一地点

(35°N , 120°E) 三年里 (1993、1995、1996) 夏季的 NO_2 混合比垂直廓线。虽然资料探测的时间相差好几年, 但三条廓线的吻合程度却好于图 8 中不同纬度的情况, 增长的趋势相同, 极大值出现的位置也都在 10 hPa 附近。这说明对 NO_2 的垂直分布而言, 较长时间里同一地点平流层内的 NO_2 含量保持稳定不变, 沿纬度上的差异大于时间上的差异。

图 10 为沿纬度 30°N 6 年平均夏季的 NO_2 混合比的经度-高度剖面图, 图中明显可看出在 1 hPa 到 100 hPa 之间的 2×10^{-9} 及 4×10^{-9} 等值线几乎平行, 这和图 7 中不同经度的 NO_2 垂直廓线在平流层重合较好是一致的。同样, 在垂直分布图中起伏较大的区间在图 10 中也可找到对应的部分。100 hPa 气层以下 NO_2 混合比含量突然增加, 在多处出现了极值, 最大值 1×10^{-8} 出现在 300 hPa, 150°E 处。

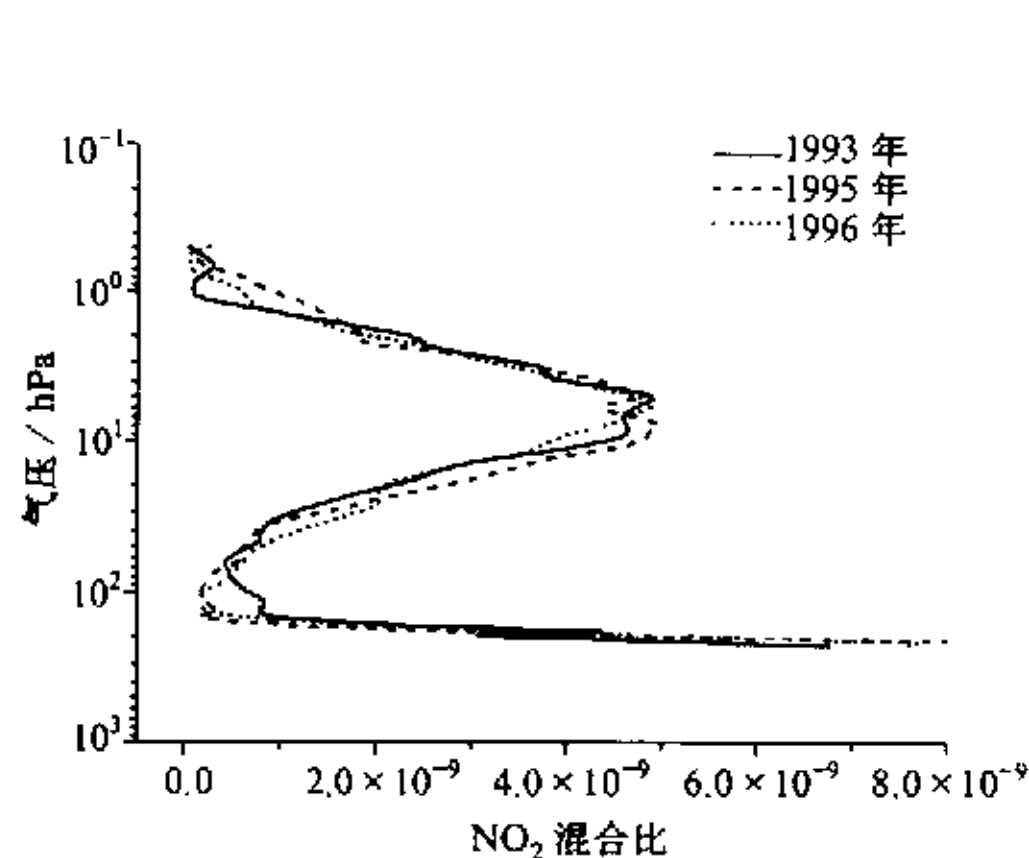


图 9 1993、1995、1996 年 (35°N , 120°E) 处 NO_2 混合比

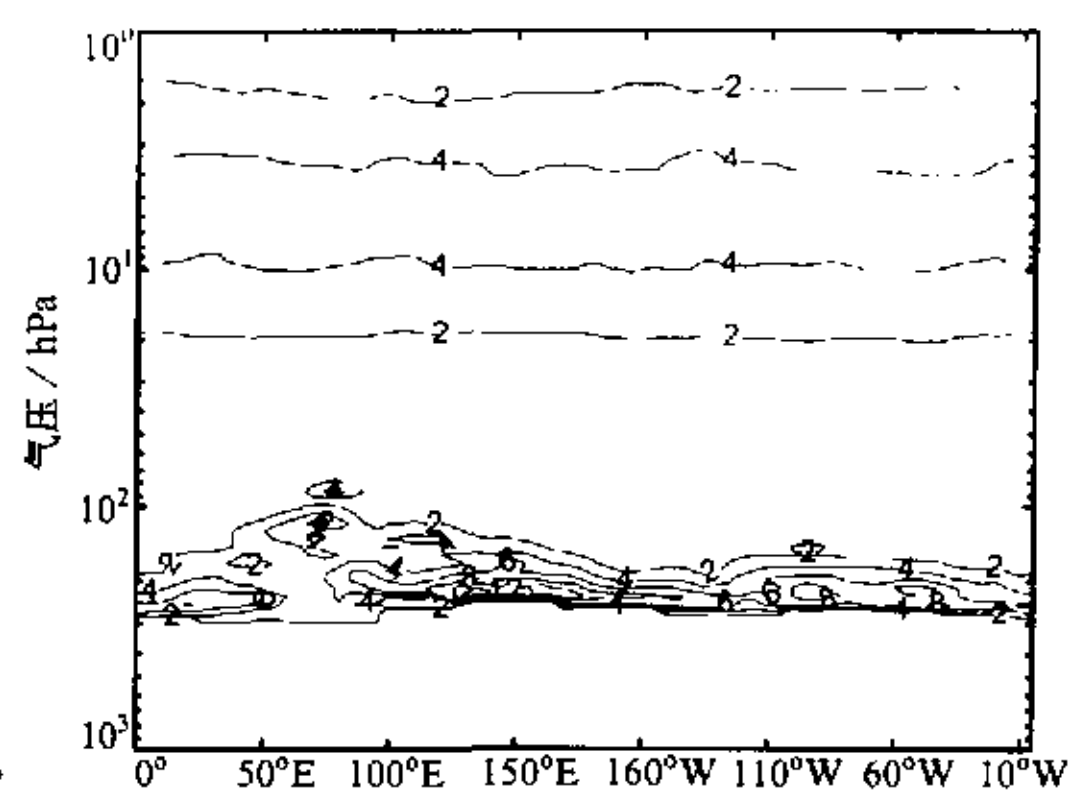
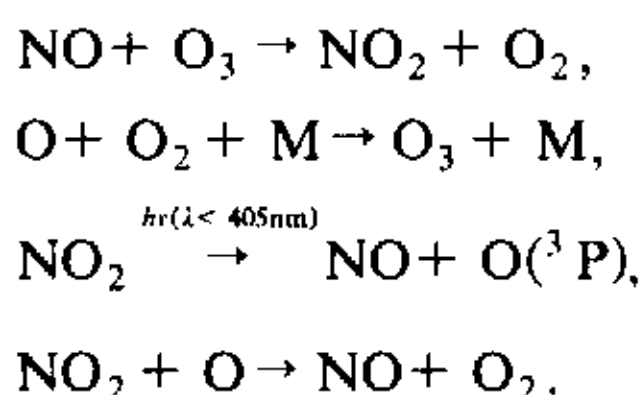


图 10 年均 NO_2 混合比 30°N 纬向剖面 (单位: 10^{-9})

在平流层中主要发生如下几种与 NO_2 有关的光化学反应:



如上的 NO_2 循环只发生在很小的时间段里, 大部分时间里 NO_2 会有不同的源和汇, 尤其在平流层下部, 白天 NO_2 很容易与原子氧或通过光离解而生成 NO 。夜间 NO_2 与 NO_3 生成五氧化二氮是主要反应^[3]。由于 NO_2 的光化反应有很强的日变化, 所以并不存在一种瞬时的稳定状态, 而是在 24 小时周期内达到一种周日变化着的平衡。通过图 7 和图 8, 可以看出在峰值点附近也就是光离解反应剧烈的地区, NO_2 混合比差异也较大。与之相对应的是 60 hPa 到 20 hPa 之间, 也就是 NO_2 从几乎为零增加到峰值这一段曲线很平滑, 不同经度的垂直廓线也比较吻合。总的来说平流层内对流很少, 长时间里 NO_2 含量仍能保持稳定。整个平流层的氮氧化物只在同一高度上有相互作用。100~300 hPa 之间气层 NO_2 有明显增加。因为这里是对流顶的下面。在对流层中, 对流活

动把地面上人类活动及工农业生产产生的大量 NO_2 气体不断向上输送。到了对流顶的下面, 由于对流活动迅速减弱, NO_2 气体难以继续向上输送, 于是在这里堆积, 形成高浓度的 NO_2 的气层。

3.3 平流层 O_3 、 NO 和 NO_2 混合比垂直分布的对应关系

图 11 是 300 hPa 到 0.01 hPa 气层内 6 年平均和沿 40°N 平均夏季三种微量气体 NO 、 NO_2 、 O_3 的混合比垂直分布图, 从图中也可以看出虽然这三种气体的混合比数值相差较大, 但它们的垂直廓线形状却相似, 100 hPa 到 10 hPa 都是混合比含量增加的区域, 含量减小的区域也基本相同, 尤其是 O_3 和 NO_2 峰值都出现在 10 hPa 附近, NO 峰值出现在 1 hPa 附近, 三种气体在 0.1 hPa 附近几乎同时达到零。这同上面的分析是一致的。图 12 显示的是特定年份 (1994 年) 和地点 (40°N , 120°E) 三种气体的混合比垂直分布, 与图 11 相比, NO 和 NO_2 的垂直分布虽然在细节上有自己的特点, 但变化趋势仍然相同。说明这三种气体有非常密切的关系, 其中一种气体含量的变化都会影响到另外两种, 从而保证在同一高度下三种气体的比例不变。郭松、周秀骥等^[7]曾利用 Brewer 臭氧仪对南极中山站上空的 O_3 、 NO_2 柱总量及平流层 O_3 、 NO_2 含量进行了三年观测研究, 也得到类似的结果。他们指出中山站上空 NO_2 柱总量 (尤其是平流层 NO_2 总量) 的季节变化趋势与 O_3 柱总量的变化趋势十分相符, 在稳定天气条件下, NO_2 含量与 O_3 含量日变化趋势为正比变化关系, 这同我们的分析也是一致的。

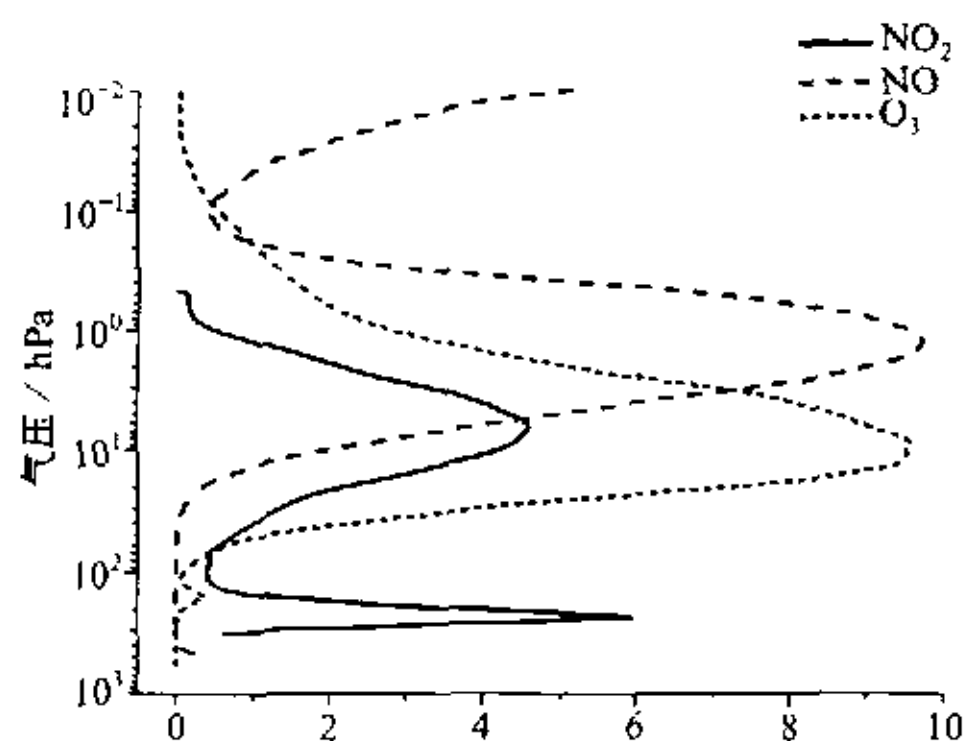


图 11 40°N 6 年平均夏季 O_3 、 NO 和 NO_2 混合比

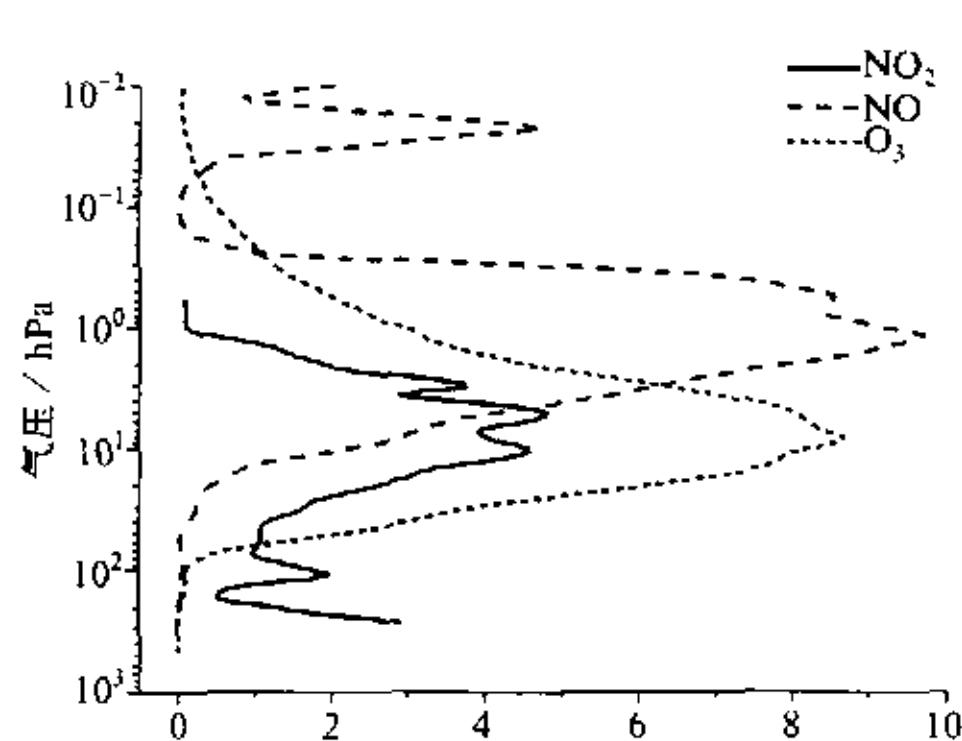


图 12 1994 年 (40°N , 120°E) 上空 O_3 、 NO 和 NO_2 混合比
(单位: O_3 的体积分数为 10^{-6} ;
 NO 和 NO_2 的体积分数为 10^{-9})

4 结论

(1) NO 混合比含量在 1 hPa 和 1×10^{-5} hPa 高度处有两个峰值, 0.1 hPa 处是一个极小值, 50 hPa 到 0.3 hPa 之间 NO 混合比含量非常稳定, 而 0.1 hPa 以上 NO 含量持续增长。在平流层中, NO 分子主要通过 N_2O 与氧原子起光化反应而离解产生。由于对流活动的匮乏, 在很长一段时间里不同地区的 NO 气体的光化生成和光离解保持稳定的平衡。在热层中的 NO 分子主要是由氮原子在太阳辐射或宇宙高能粒子作用下

与氧分子反应生成的, 分布有很大起伏。

(2) NO_2 混合比含量在 100 hPa 及 0.5 hPa 高度处是极小值, 几乎为零, 到 5~10 hPa 处则为最大值。这一区间主要处于平流层内。但 100 hPa 往下进入对流层后含量急剧增加, 往往会超过 1×10^{-8} 。在平流层中 NO_2 分布廓线也是基本吻合的, 沿不同经度, 其极值出现的位置也变化不大, 但沿不同纬度, 其极值出现高度有一定差异。

(3) 在中层大气中 NO_2 和 O_3 具有非常相似的分布特征, 尤其在平流层, 它们几乎在同一高度达到极值, 说明它们之间有非常密切的联系。氮氧化物和臭氧之间的相互转化速率及它们的分布特征都是值得我们关注的重要问题。

HALOE 资料是一种临边遥感资料, 观测时间在昼夜交替时。而对于 NO 和 NO_2 , 日出和日落的观测结果会有所不同。不过从文献[2]中提供的分析图可以看出在同一天中, 日出与日落时间观测到的 NO_x 混合比的垂直廓线很相似, 只是其数值有所不同。我们这里给出的只是用夏季日出时的观测资料分析出的结果。

感谢: UARS 卫星计划的研究人员提供了 HALOE 资料并放在网上自由下载, 为我们的工作提供了帮助。

参 考 文 献

- 1 [比]G. 布拉塞, [美]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, 262~263, 275~276.
- 2 Russell, III, J. M., Larry L. Gordley, J. H. Park et al., The halogen occultation experiment, *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(D6), 10777~10797.
- 3 Luo Mingzhao, J. M. Russell III, R. J. Cicerone et al., Analysis of selected nitric oxide observations in the lower thermosphere by HALOE on UARS, *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20(12), 1307~1310.
- 4 Nedoluha, G. E., D. E. Siskind, J. T. Bacmeister et al., Changes in upper stratospheric CH_4 and NO_2 as measured by HALOE and implications for changes in transport, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(7), 987~990.
- 5 Dessler, A. E., S. R. Kawa, D. B. Considine et al., UARS measurements of ClO and NO_2 at 40 and 46 km and implications for the model "Ozone Deficit", *Geophys. Res. Lett.*, 1996, 23(4), 339~342.
- 6 Nevison, C. D., S. Solomon and R. R. Garcia, Model overestimates of NO_x in the upper stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 24(7), 803~806.
- 7 郭松, 周秀骥等, 南极中山站 NO_2 的观测及平流层 NO_2 与 O_3 的关系分析, 极地研究, 1997, 9(3), 163~168.

NO_x Vertical Distribution in the Middle Atmosphere in the Northern Hemisphere

Jian Jun, Chen Yuejuan and Zheng Bin

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

Wu Beiyong

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

Abstract The HALOE sunrise data observed by UARS satellite in the summer of 1992~1996 and

1998 are analyzed and interpolated to a $5^\circ \times 5^\circ$ grid region. The analysis of vertical cross section of the averaged NO_x mixing ratio along 30°N and 40°N have been made. The vertical distributions of NO_x at different longitudes and latitudes are compared. The results show that there are two peaks of NO mixing ratio at 1 hPa and 1×10^{-5} hPa, respectively, and a minimal value at 0.1 hPa. NO mixing ratio is very steady between 50 hPa and 0.3 hPa, firmly increasing above 0.1 hPa and undulating in the thermosphere. It also shows that NO_2 mixing ratio is minimal at 100 hPa and 0.5 hPa, reaching maximum between 5 hPa and 100 hPa, but rapidly increasing below 100 hPa in the troposphere. In the stratosphere, the profiles of NO_2 distribution are primary conformity. The position of the maximum is nearly unchanged at different longitudes and a little variance at different latitudes while the lower latitudes get higher maximum position. The NO_x and O_3 distributions have much similar characteristics in the middle atmosphere, especially in the stratosphere; they reach maximum at nearly the same pressure. It seems that they have very close relationship.

Key words: nitrogen oxides; HALOE observation data; vertical distribution