

史华锋, 李倩, 邵爱梅, 等. 2014. 南北极区冬春季节大气平流层 CO 次峰现象 [J]. 大气科学, 38 (1): 73–82, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12149.
Shi Huafeng, Li Qian, Shao Aimei, et al. 2014. Sub-peaks of CO concentration in the stratosphere over polar regions during winter to spring seasons [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 73–82.

南北极区冬春季节大气平流层 CO 次峰现象

史华锋^{1,3} 李倩² 邵爱梅¹ 卞建春² 吕达仁²

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

3 中国人民解放军 93601 部队, 大同 037006

摘 要 ACE-FTS (加拿大“大气化学实验”的傅里叶变换光谱仪) 和 Aura-MLS (美国 Aura 卫星的微波临边探测器) 卫星 CO 观测资料的分析结果显示, 南北半球极区大气平流层中部, 于当地冬末春初季节存在明显的 CO 浓度垂直分布次峰值现象。应用观测密度较大、范围覆盖较广的 Aura-MLS 卫星资料, 通过对冬春季节极区 CO 浓度的季节内变化进行分析后发现, 冬季来自大气中间层富含 CO 的空气能够逐渐下沉并进入到平流层中部, 在冬末春初时节, 平流层上部的 CO 浓度快速下降, 而平流层中部的 CO 浓度变化则较慢, 从而使大气平流层中 CO 浓度呈现悬球状的空间分布结构, 卫星观测廓线资料分析结果则呈现出次峰值现象。相应的同化气象数据 MERRA 的风场资料和 Aura-MLS 卫星观测 OH 资料分析结果表明, 垂直输送的减弱、水平交换的加强和 OH 浓度的回升可能是导致平流层上部 CO 浓度快速减少的原因, 而在平流层中部极低的 OH 浓度以及极弱的水平交换使 CO 保持较长的化学寿命, 并使这一现象得以从晚冬维持到春季。

关键词 CO 大气平流层 极区 次峰现象

文章编号 1006-9895(2014)01-0073-10

中图分类号 P402

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12149

Sub-Peaks of CO Concentration in the Stratosphere over Polar Regions during Winter to Spring Seasons

SHI Huafeng^{1,3}, LI Qian², SHAO Aimei¹, BIAN Jianchun², and LÜ Daren²

1 School of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Troop 93601, The People's Liberation Army, Datong 037006

Abstract Analysis of CO from spaceborne ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment, Fourier Transform Spectrometer) and Aura-MLS (Aura satellite, Microwave Limb Sounder) satellite observations highlights the existence of a sub-peak in CO profiles from late winter to early spring in the polar regions of both the northern and southern hemispheres at the 10 hPa level (i.e., in the middle of the stratosphere). Further analysis of Aura-MLS satellite data demonstrates that air from the mesosphere, which is rich in CO, descends into the stratosphere gradually in early winter. Moreover, while the CO concentration in the upper stratosphere decreases rapidly during late winter, CO concentration in the middle stratosphere changes very slowly. This results in the dramatic emergence of a suspended spherical structure in

收稿日期 2012-09-12, 2013-04-16 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB428602, 国家自然科学基金项目 41005023、41275046, 教育部第 44 批留学回国人员科研启动资金资助项目

作者简介 史华锋, 男, 1985 年出生, 硕士研究生, 主要从事平流层大气化学成分时空分布和变化及其相关机制的研究。E-mail: shihf10@lzu.edu.cn

通讯作者 李倩, E-mail: qian.li@mail.iap.ac.cn

the stratosphere, defined by high CO concentrations; the satellite observation shows such a sub-peak in the CO concentration profiles. Analysis of the MERRA (the Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications) assimilated data and OH concentrations from Aura-MLS satellite observations suggests that weakening of vertical transport from the mesosphere to stratosphere, enhancement of horizontal exchange, and recovery of the OH concentration may play important roles in reducing CO concentration in the upper stratosphere. However, CO in the middle stratosphere can survive for a relatively long time owing to both the isolation imposed by the transport barrier and the lower OH concentration in the polar regions, thus allowing the sub-peak to persist from late winter to spring.

Keywords CO, Stratosphere, Polar region, Sub-peak

1 引言

CO 作为一种重要的大气污染物,其在大气中的浓度分布和时空变化受到了广泛关注。在大气对流层,通过相应的化学反应过程,CO 对大气中 OH 和臭氧等重要成分的浓度具有显著的调制作用,从而影响了大气化学系统进而产生了相应的气候效应。此外,较长的化学寿命和较大的浓度梯度,也使 CO 常被用作研究大气运动和污染物输送的示踪物,例如近年来在亚洲夏季风区上对流层—平流层卫星观测到的 CO 等污染物积聚形成的“污池”现象 (Park et al., 2008),进一步揭示了亚洲夏季风在大气平流层—对流层交换过程中的重要作用。

大气对流层 CO 主要来自于含碳物质的不完全燃烧、生物活动和 CH₄ 氧化,通过和 OH 的化学反应被清除。大气平流层 CO 主要来自于 CH₄ 与 O、Cl 和 OH 等成分的氧化反应。同样,平流层中的 CO 也会与该区域较为富集的 OH 产生化学反应。大气平流层上部及大气中间层的 CO 主要来自于该

层次大气中 CO₂ 的光解,因而中高层大气中的 CO 浓度较高 (Hays and Olivero, 1970)。图 1 为 Aura-MLS 卫星观测 (详细介绍见 2. 观测资料) 南北纬 82° 之间、垂直方向 215~0.1 hPa 的 2005~2010 年 CO 浓度多年纬向平均分布。该图展示了地球大气中 CO 的平均分布状况。可以看出,大气中 CO 在垂直方向存在明显的浓度梯度分布。其中,热带地区大气对流层顶附近 CO 浓度较高,得益于热带地区旺盛的垂直向上输送过程。而相应的平流层中下部 (100~10 hPa) CO 浓度较低。自平流层上部开始,CO₂ 的光解则使 CO 浓度急剧增大,在 0.1 hPa 高度平均浓度 (本文所指浓度均为体积混合比浓度) 高达 0.5~1.5 ppm (10⁻⁶, 下同)。

在中层大气存在着极向极的大尺度环流 (Shepherd, 2007),其上升支位于夏半球,下沉支位于冬半球。通过对具有中间层“属性”的大气成分 (CO、H、NO_x) 的观测证明冬半球的下沉运动贯穿中间层—平流层,中间层的空气可下沉至平流层中部 (Fisher et al., 1993; Filipiak et al., 2005;

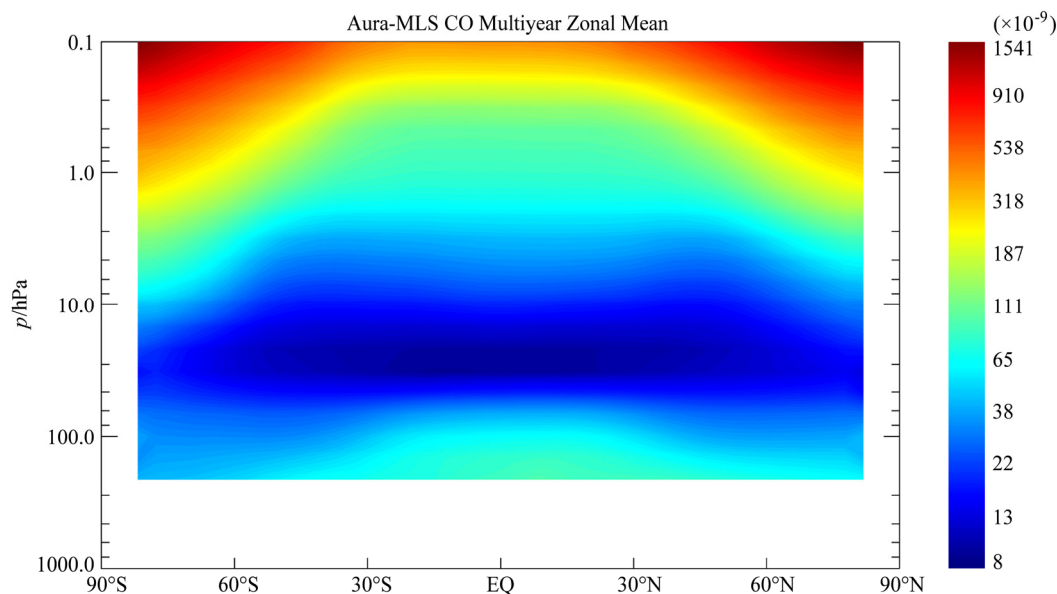


图 1 2005~2010 年 Aura-MLS CO 浓度 (ppb, 10⁻⁹, 下同) 多年纬向平均分布

Fig. 1 Zonal mean of Aura-MLS (Aura satellite, Microwave Limb Sounder) CO volume mixing ratio (VMR) during 2005–2010

Engel et al., 2006)。这种季节性的下沉运动在图 1 中表现为在平流层上部自赤道向高纬地区 CO 浓度的显著增加。基于地基 CO 的观测研究, Solomon et al. (1985) 很早就提出将 CO 作为高层大气运动示踪物, 尤其是高纬地区夏季的上升运动和冬季的下沉运动。此后 CO 被广泛用于研究中间层及以上大气的大尺度环流和平流层—中间层的垂直传输 (Manney et al., 1999; Allen et al., 2000; de Zafra et al., 2004; Lee et al., 2011)。

卫星观测是研究中层大气化学系统和动力结构的重要手段 (吕达仁和陈洪滨, 2003; 陈洪滨, 2009)。搭载于加拿大 SCISAT-1 卫星的傅里叶变换光谱仪 (ACE-FTS) 和美国 Aura 卫星的微波临边探测器 (MLS) 是目前仍在运行的两种卫星观测仪器, 并已积累了较长时间的观测资料 (详细介绍见 2. 观测资料)。我们在对 2004~2008 年的 ACE-FTS 的 CO 廓线资料进行分析时发现, 冬春季节南北半球高纬地区有相当一部分廓线在平流层中部存在次峰值现象, 采用 Manney et al. (2007) 提出的 ACE-FTS 与 Aura-MLS 的采样比较方法, 使用 Aura-MLS 资料对这一现象进行了确认。此前 Clerbaux et al. (2005) 曾分析了 ACE-FTS 卫星观测数据前八个月的资料, 文中的廓线图在平流层也展现了 CO 次峰值现象, 但该研究并未就此现象给予进一步的详细分析。本文将利用 ACE-FTS 和 Aura-MLS 卫星观测数据, 结合 MERRA 气象再分析资料, 深入研究极区大气平流层 CO 次峰现象的时空特征及其

形成机制。

2 观测资料

2.1 ACE-FTS

大气化学实验 (Atmospheric Chemistry Experiment, 简称 ACE) 是由加拿大主持的一项地球大气卫星探测计划 (Bernath et al., 2005)。隶属于 ACE 的卫星 SCISAT-1 于 2003 年 8 月 12 日发射, 圆形极地轨道, 高度 650 km, 倾角 74°。SCISAT-1 搭载的主要仪器之一是一个高光谱分辨率 (0.02 cm^{-1}) 的傅里叶变换光谱仪 (Fourier Transform Spectrometer, 简称 FTS), 工作波段 $750 \sim 4400 \text{ cm}^{-1}$, 通过太阳掩星方式探测南北纬 85° 之间、云顶至 110 km 高空范围内的大气温、湿和几十种大气成分垂直分布。ACE-FTS 的 CO 资料垂直分辨率为 $3 \sim 4 \text{ km}$ 。初期的数据验证工作和随后的伴随验证均表明, FTS 对 CO 的观测误差很小, 上对流层至 40 km 优于 5%, 40 km 以上优于 10% (Clerbaux et al., 2008)。本文将误差小于 10% 作为遴选数据的标准。

本文采用的 ACE-FTS CO 资料包括 v2.2 (2004 年 1 月至 2007 年 8 月) 版本和 v3.0 (2008 年 1 月至 2008 年 6 月) 版本, 共 12402 条大气 CO 廓线。图 2 为 ACE-FTS 观测资料 2004 年 1 月至 2008 年 6 月所有廓线的全球分布图。该图显示, ACE-FTS 在中高纬度的观测密度比在低纬度大的多, 这是由于 ACE 主要科学目标之一是研究高纬地区的大气化学、动力过程。

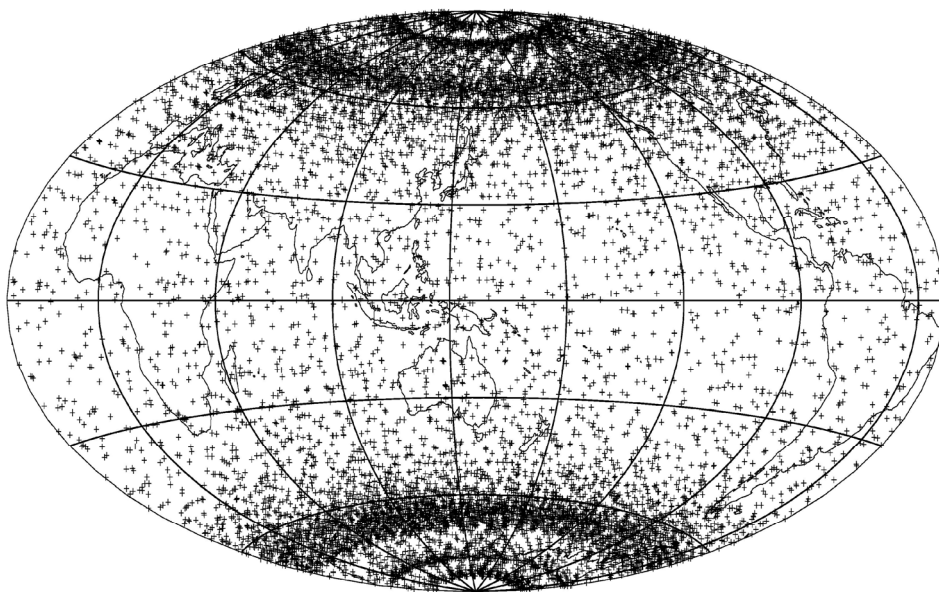


图2 2004年1月至2008年6月ACE-FTS所有廓线观测点的全球分布

Fig. 2 Global scatter distribution of the geographical locations of ACE-FTS satellite observation from January 2004 to June 2008

2.2 Aura-MLS

微波临边探测器 (Microwave Limb Sounder, 简称 MLS) 是美国地球观测系统 (Earth Observing System, EOS) Aura 卫星载荷仪器之一 (Waters et al., 2006)。Aura-MLS 通过探测卫星轨道前方地球大气切线方向的热辐射对大气成分、温度和冰云等进行观测。该卫星于 2004 年 7 月 15 日发射, 近极地太阳同步轨道, 高度 705 km。Aura-MLS 每天可获得多达 3500 条的 CO 廓线资料, 范围覆盖南北纬 82° 之间, 垂直可用范围 215~0.0046 hPa, 垂直分辨率 3.5~5.0 km。本文所用的 Aura-MLS CO 卫星资料为第二级 (Level 2) v3.3 版。表 1 所列为 MLS CO 在不同高度上的水平分辨率、观测精度和系统偏差 (Pumphrey et al., 2007; Livesey et al., 2008)。由于观测存在较大的随机误差, 因此在使用 Aura-MLS 资料时要尽可能的采用多线平均以去除随机误差的影响。

表 1 Aura-MLS CO 资料参数(引自 <http://disc.gsfc.nasa.gov/>)
Table 1 Data information summary for Aura-MLS CO (quoted from <http://disc.gsfc.nasa.gov/>)

气压高度 (hPa)	垂直/水平 分辨率 (km)	观测精度 (ppb)	系统偏差
0.0046	7/200	11000	+20%~+50%
0.01	6/200	4000	+20%~+50%
0.046	6/200	1200	+20%~+50%
0.14	3.5/200	700	+20%~+50%
1	4/220	150	+20%~+50%
10	5/400	15	±10%
31	5/350	14	-70%~-50%
100	4.5/450	14	±20 ppb (±30%)
147	5/600	15	±30 ppb (±30%)
215	5.5/700	19	±30 ppb (±30%)

本文所用的 OH 资料也来自于 Aura-MLS v3.3 版, 资料的可用范围为 32~0.0032 hPa, 关于资料的分辨率、观测精度和系统偏差及数据质量控制详情可参阅 Aura-MLS v3.3 资料手册 (<http://disc.gsfc.nasa.gov/>) 和相关文献 (Pickett et al., 2006)。

2.3 MERRA

MERRA (the Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) 是 GMAO (the Global Modeling and Assimilation Office) 利用三维变分资料同化系统 GEOS-5 DAS 生成的气象再分析资料 (Rienecker et al., 2011), 其特点是吸收了大量的卫星观测资料和辐射观测资料, 并使用了一系列最新的物理过程方案和资料同化方法。MERRA 资料采用同化模式水平分辨率 $0.67^\circ \times 0.5^\circ$, 垂直方向

72 层, 模式高度 0.01 hPa。其产品分辨率因要素而异, 本文使用的风场资料即来自 MERRA 数据集, 水平网格距 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$, 垂直方向 42 层, 垂直高度至 0.1 hPa。

3 研究方法和结果分析

3.1 现象展示

如前文所述, Aura-MLS 的观测频次和空间覆盖范围均大于 ACE-FTS, 在对比两种卫星资料时, 往往需要考虑如何从 Aura-MLS 数据中选择与 ACE-FTS 数据在观测时间和地点上较为一致的观测廓线。Manney et al. (2007) 提出了一种较为可行的办法, 即在 ACE-FTS 观测时间前后 12 小时, 观测点南北各 1 个纬度之间、东西各 8 个经度范围内的 Aura-MLS 平均廓线被近似认为与该 ACE-FTS 廓线具有“同性质”。

本文采用 Manney et al. (2007) 提出的方法, 对 Aura-MLS 和 ACE-FTS 卫星观测资料进行分析, 并挑出两类卫星资料中具有“同性质”的廓线进行比较。图 3 显示了南北纬 $70^\circ \sim 80^\circ$ 之间的 CO 廓线在不同季节的分布特征。从该图中可以看到, ACE-FTS 和 Aura-MLS 卫星观测数据均显示在南北半球冬春季的平流层中部 (约 10 hPa) 存在 CO 浓度次峰值现象, 其中次峰值出现的位置和峰值浓度均有很好的 consistency, 而在夏秋季节则不具备这种特征。图 3a、b 显示北半球冬季 (DJF 时段) CO 浓度的峰值高度出现在约 8 hPa 附近, 峰值浓度约 300 ppb; 春季 (MAM 时段) 时峰值高度略有下降, 出现在约 10 hPa 高度, 峰值浓度降为约 180 ppb。图 3c、d 显示南半球冬季 (JJA 时段) 峰值高度出现在约 8 hPa, 峰值浓度约 420 ppb; 而春季 (SON 时段) 时峰值出现的高度没有出现明显下降的现象, 仅峰值浓度下降为 300 ppb 左右。综合比较来看, 相较北半球而言, 南半球冬春季平流层中部 CO 浓度廓线具有更显著的次峰值结构特征。

本文研究发现, 冬春季平流层中部 CO 浓度次峰现象不仅出现在高纬地区, 甚至可扩展到南北纬 50° 附近, 但是相对高纬地区, 次峰现象在中纬地区出现的几率较低。而这一现象分别开始于 2~3 月份 (北半球) 和 8~9 月份 (南半球), 即冬半球的晚冬初春季节。

利用卫星观测资料对南北半球极区大气平流层 CO 浓度分布进行 2005~2010 多年单日平均 (图

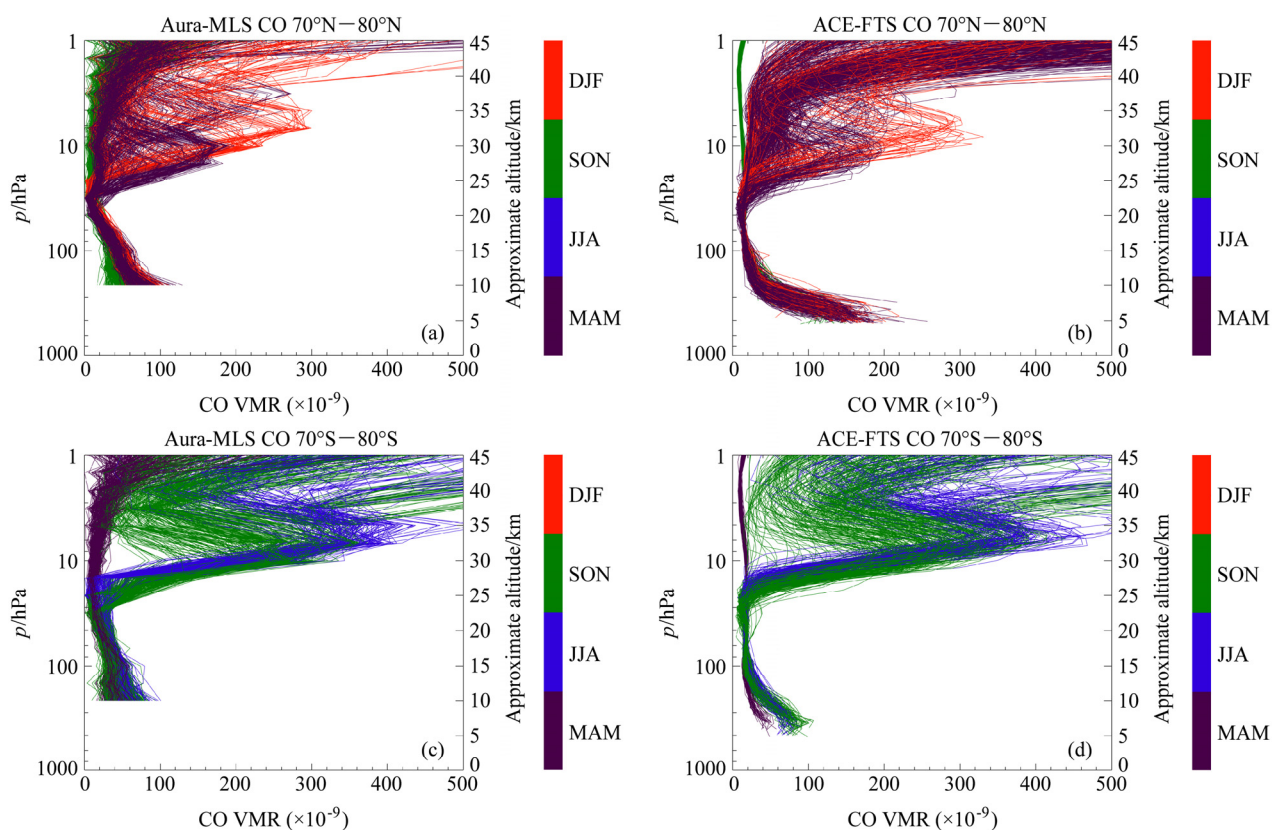


图3 Aura-MLS 和 ACE-FTS 南北纬 70°~80°不同季节 CO 浓度 (ppb) 垂直廓线族。MAM: 3~5 月; JJA: 6~8 月; SON: 9~11 月; DJF: 12~2 月
Fig. 3 Comparisons of the CO concentration vertical profiles (ppb) located in latitudes 70–80 between Aura-MLS and ACE-FTS. MAM (Mar–Apr–May), JJA (Jun–Jul–Aug), SON (Sep–Oct–Nov), and DJF (Dec–Jan–Feb), respectively

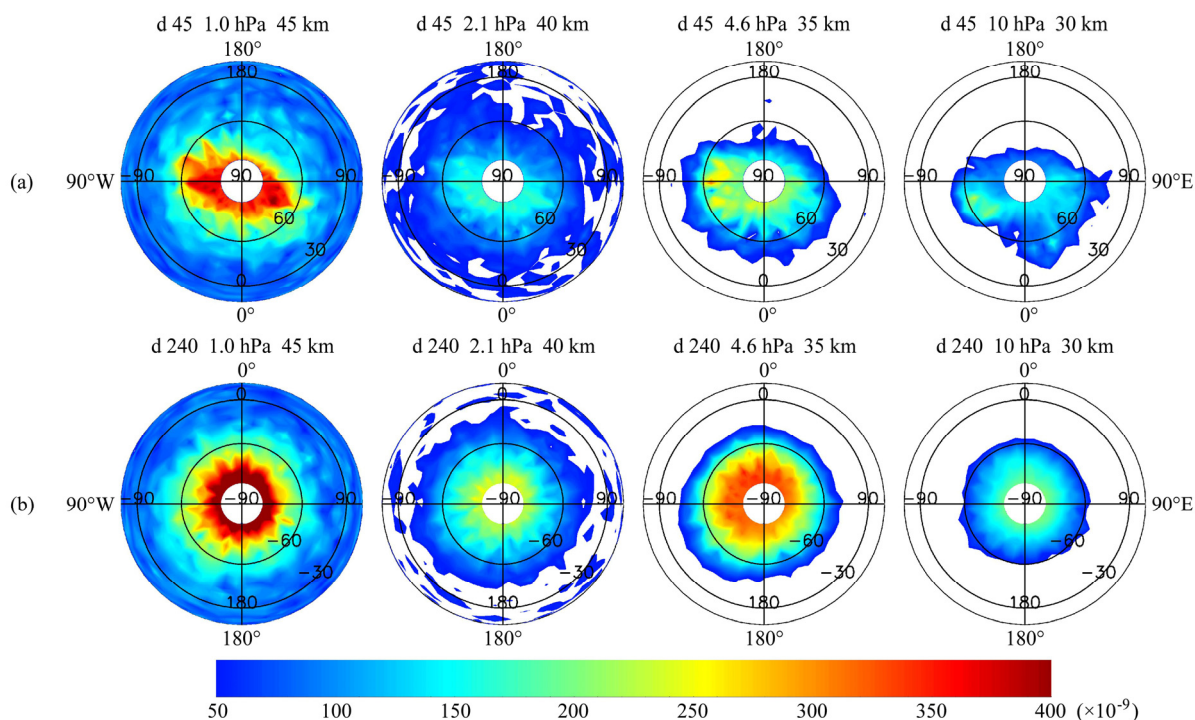


图4 Aura-MLS CO 浓度 (ppb) 2005~2010 年多年单日平均在不同高度上的水平分布。(a) 2 月 14 日北半球; (b) 8 月 28 日南半球。左起第一列: 1.0 hPa 高度; 第二列: 2.1 hPa 高度; 第三列: 4.6 hPa 高度; 第四列: 10 hPa 高度
Fig. 4 Distribution of daily mean CO mixing ratio (ppb) from Aura-MLS data (2005–2010) at different pressure levels for (a) the Northern Hemisphere on February 14 and (b) the Southern Hemisphere on August 28

4), 结果表明当次峰值现象出现时, CO 浓度分布具有在垂直方向上呈悬球状的空间分布结构, 即在平流层的中部出现一个较大的 CO 富集区, 随高度增加 CO 的浓度减少, 在平流层顶附近时浓度又随高度增加。

3.2 机制分析

本节首先对 2005~2010 年南北半球高纬地区大气平流层 CO 浓度变化进行了分析, 并具体以较为典型的 2007 年南半球冬春季极区平流层 CO 的浓度变化为例, 探讨 CO 次峰现象的形成机制。

图 5 展示了 2005~2010 年南北半球平流层中上部不同高度高纬至极地地区 (纬度 $60^{\circ}\sim 82^{\circ}$ 之间) Aura-MLS CO 平均浓度随时间的变化。在北半球 (图 5a) 1 hPa 高度上 CO 的浓度峰值出现于 11 月至来年 1 月; 而在南半球 (图 5b) 1 hPa 高度上 CO 的浓度峰值则出现于 4 月至 9 月, 持续时间几乎是北半球的两倍, 表明了南北半球平流层大气化学系统时空特征上的差异。相较于 1 hPa 高度, 较低高度上的极区大气中也同样依次对应出现了 CO 的浓度峰值, 但随高度下降该峰值发生时间相应延迟, 同时峰值浓度减小, 持续时间缩短。通过图 5 可以看出, 南半球和北半球的大气平流层中上层 CO 浓度峰值都存在着显著的年际变化, 其中北半球的峰值结构年际变化过程更为复杂, 例如 2005~2006 年北半球极区冬季平流层顶 CO 浓度的表现为双峰结构, 值得关注的是在此期间出现了近年来北半球最强的平流层爆发性增温过程 (Manney et al., 2008)。平流层大气 CO 浓度是极低的, 水平方向的输送不会引起极区 CO 浓度的显著上升, 只有通过平流层以上大气的下沉过程才有机会造成平流层大气中 CO 浓度的上升, 因此大气中自上而下的 CO 峰值浓度的递减和时间位相上的滞后是冬季中间层大气成分向平流层大气垂直输送过程的反映。

除了垂直输送过程 (下文以 S_1 表示), 高纬地区大气平流层中 CO 浓度变化还取决于其他几个因素: CO_2 的光解和 CH_4 氧化, OH 对 CO 的氧化清除, 水平输送过程 (以 S_2 表示), 中括号表示该种大气成分的浓度, 即存在以下关系:

$$[\text{CO}] = f([\text{CO}_2], [\text{CH}_4], [\text{OH}], S_1, S_2). \quad (1)$$

图 5 显示在中间层—平流层垂直运动极弱的夏半年, 平流层中的 CO 浓度极低且很稳定, 这一较低的浓度水平主要是由 CO_2 光解、 CH_4 氧化和 OH 清除之间的化学平衡来维持的。冬春季节光照减

弱, 温度降低, 极涡内的大气成分化学活性下降, 来自中间层的下沉空气使极区 CH_4 浓度降低 (刘传熙等, 2009), ACE-FTS 卫星资料分析结果显示这种下沉运动对 CO_2 影响不大 (具体表现为 CO_2 在中层大气垂直浓度分布基本一致, 图略), 因此可忽略 CO_2 光解、 CH_4 氧化对 CO 浓度变化的影响。OH 的浓度很低, 但是化学活性很强, 其对 CO 的化学清除作用不可忽略。此外冬末春初时平流层极涡变弱并趋于崩溃, 为极涡内外空气的交换创造了条件 (Manney et al., 2009)。接下来本文将进一步分析 S_1 、 S_2 和 OH 浓度变化对极区平流层 CO 浓度的影响。此外, 在大气平流层中 O_3 对 CO 的作用比较微弱 (Solomon et al., 1985; Minschwaner et al., 2010), 因此本文不针对 O_3 与 CO 的相互作用展开深入讨论。

图 6a 显示 8 月份平流层上部 CO 浓度基本保持不变, 从 9 月初开始, 平流层上部 CO 浓度迅速下降, 并首次低于平流层中部的 CO 浓度, 相应的廓线分析显示 (图未给出) CO 垂直分布出现次峰值现象, 此后仅一个月时间, 平流层上部 (1 hPa 高度左右) CO 浓度便迅速降低并恢复至夏半年水平, 而平流层中部 (10 hPa 高度左右) CO 浓度峰值则一直持续至 11 月底。图 6b 显示 8~11 月份高纬地区 OH 浓度整体处于稳步回升阶段。OH 主要来自于光解反应, 与太阳光照密切相关, OH 浓度的回升与太阳直射点的南移相对应。但是平流层中部的 OH 浓度远低于上部 (请注意图中为指数色标), 即使在 11 月末, 平流层中部的 OH 浓度也只有约 0.01 ppb。图 6c 显示 8~11 月份环南纬 60° 的西风大值中心随着时间推移向下移动, 与 CO 浓度峰值的变化特征相对应。8~11 月份平流层中下部始终维持西风环流, 但是在九月中旬, 平流层上部的西风环流逐渐转变为东风环流, 结合温度场的变化特征 (图未给出), 该过程对应了南半球高纬平流层的最后一次增温过程。图 6d 为南纬 60° 经向风 V 北风分量的纬向平均随时间的变化, 代表了中纬地区大气向极区大气输送的特征。与纬向风 U 的变化特征相比, 经向风 V 的北风分量变化较为复杂, 八月上旬和中旬平流层上部北风分量的分别出现两次异常加强, 自 9 月初开始, 北风分量持续增强, 并在纬向风由西风环流转变为东风环流的同时 V 风速达到极大, 这一变化与 CO 的浓度的变化密切对应。图 6e 为南纬 60° 经向风北风分量的平均涡动 V' 随时

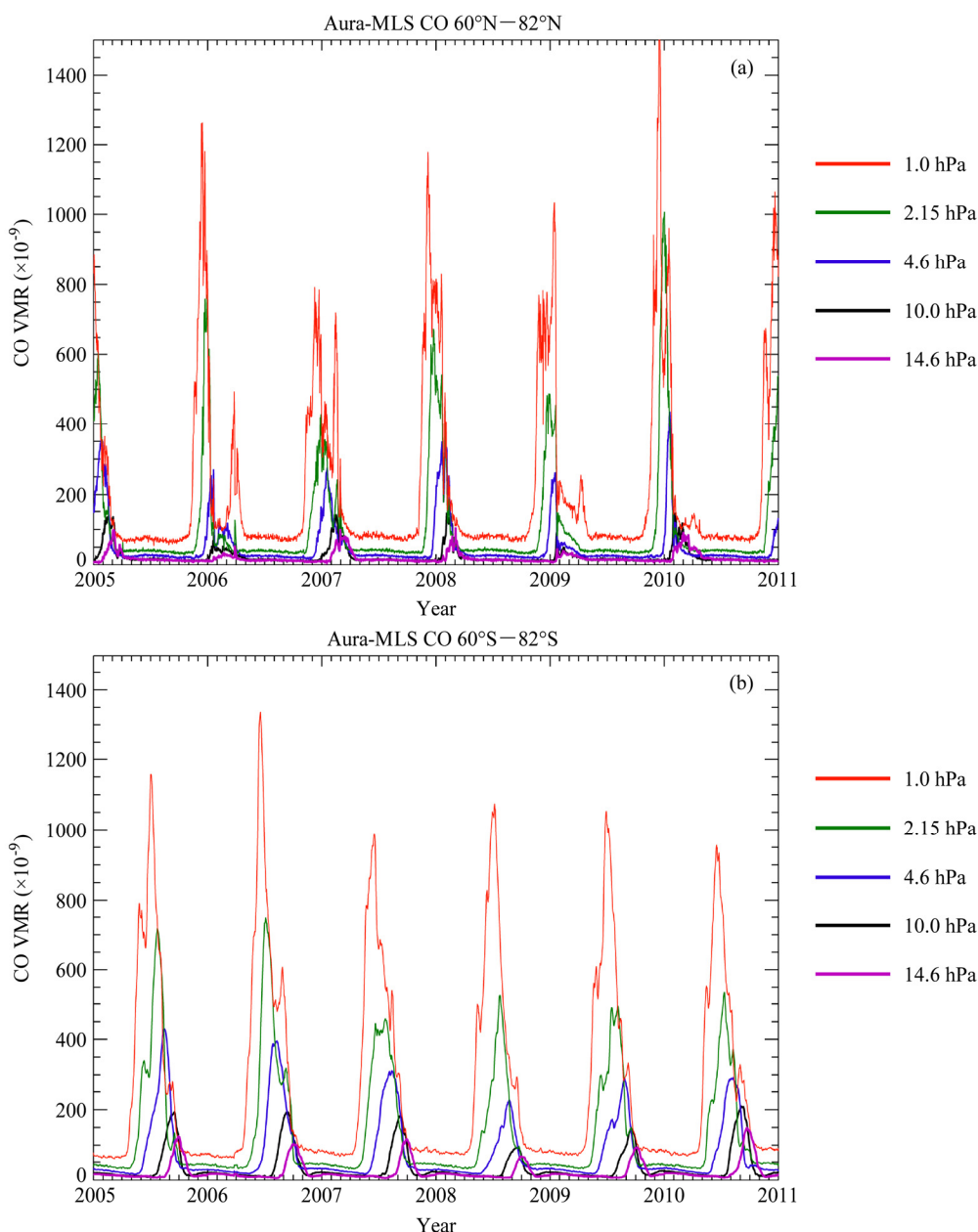


图5 南北纬 $60^{\circ}\sim 82^{\circ}$ 之间 Aura-MLS CO 平均浓度 (ppb) 随时间的变化: (a) 北半球; (b) 南半球

Fig. 5 Variation of the Aura-MLS CO mixing ratio (ppb) averaged over latitudes $60^{\circ}\sim 82^{\circ}$: (a) Northern Hemisphere; (b) Southern Hemisphere

间的变化,代表了中纬地区向极区大气涡动输送的变化(负值代表指向极区的涡动输送,正值相反)。 V' 与经向风 V 的北风分量的变化特征相似,但在平流层上部的变化幅度最大,而在平流层中下部变化幅度较小。综合对比以上分析可以发现,平流层上部 CO 浓度的急剧变化与纬向风的减弱及逆转、经向输送的增强和 OH 浓度的指数式增加相对应,而这些因素都能够影响到大气中 CO 的浓度并在冬春季节导致平流层上层 CO 浓度降低。与此同时,平流层中下部 CO 浓度的缓慢变化则与始终维持的西风环流、较弱的经向输送和极低的 OH 浓度相对应。

此外值得关注的是以 CO 的 800 ppb (约 0.5 hPa 高度极区大气的平均 CO 浓度)等值线的变化来看,图 6a 显示至少在八月初 800 ppb 等值线便开始收缩,意味着此时中间层大气中的 CO 向下输送被减弱,因而削弱乃至切断了极区平流层 CO 的主要来源。

4 结论和讨论

在 ACE-FTS 和 Aura-MLS 卫星观测数据 CO 廓线资料的分析中,我们发现冬春季节高纬地区大气平流层中部存在着 CO 浓度的次峰值现象,并对

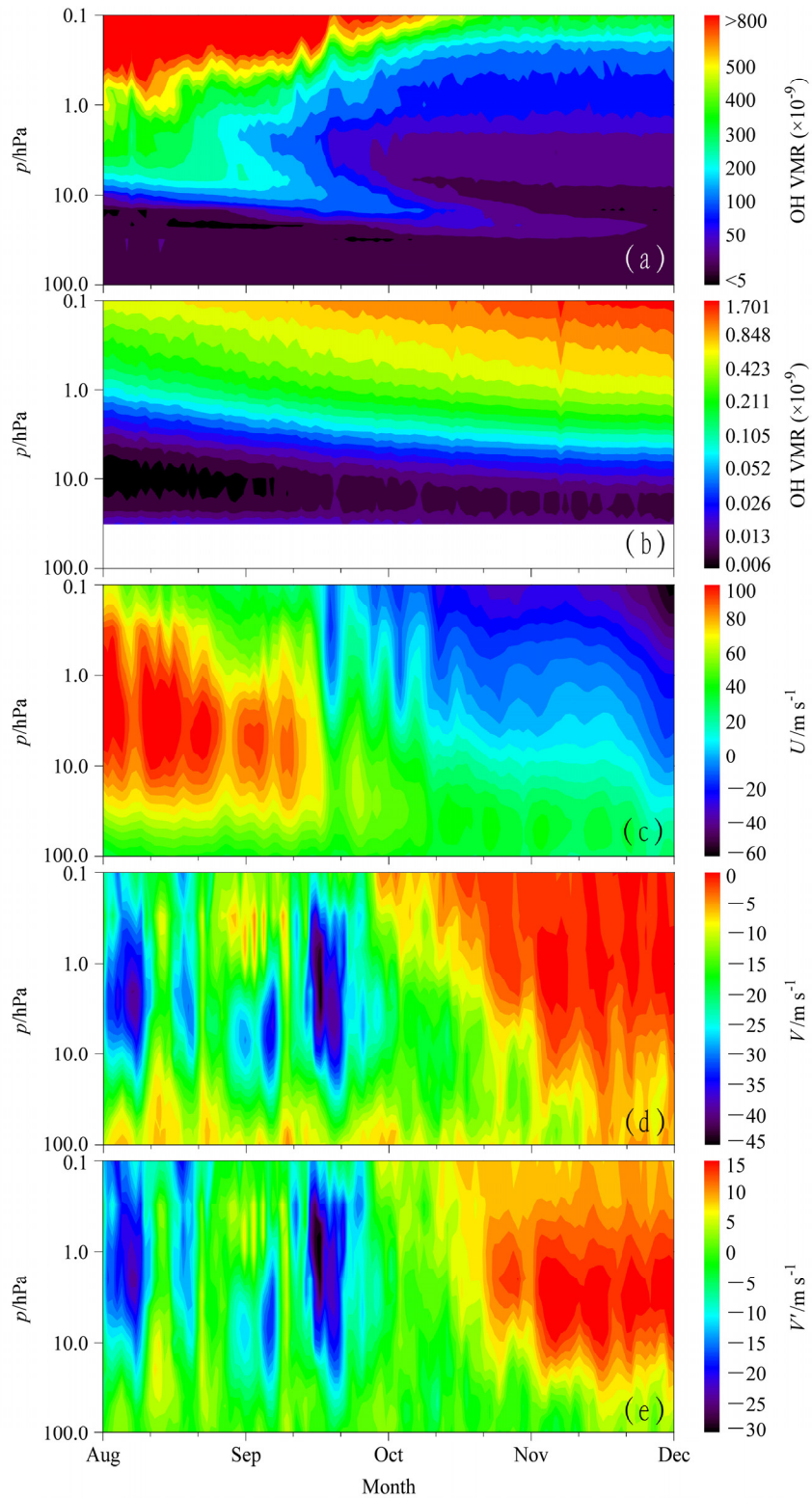


图 6 2007 年 8~11 月南半球高纬地区各要素随时间的变化: (a) 南纬 $60^{\circ}\sim 82^{\circ}$ 之间 Aura-MLS CO 的平均浓度 (ppb); (b) 南纬 $60^{\circ}\sim 82^{\circ}$ 之间 Aura-MLS OH 的平均浓度 (ppb); (c) 南纬 60° 纬向风 U (m s^{-1}) 的纬向平均; (d) 南纬 60° 经向风 V (m s^{-1}) 北风分量的纬向平均; (e) 南纬 60° 经向风 V (m s^{-1}) 北风分量的平均涡动 V'

Fig. 6 (a) The evolution of the mean mixing ratio of Aura-MLS CO (ppb) averaged in $60^{\circ}\text{S}\sim 82^{\circ}\text{S}$; (b) same as in (a), but for the Aura-MLS OH mixing ratio (ppb); (c) the MERRA U -wind (m s^{-1}) averaged at 60°S ; (d) same as in (c), but for the southward MERRA V -wind (m s^{-1})北风分量的纬向平均; (e) same as in (c), but for the transient southward MERRA V' -wind (m s^{-1}). All figures are plotted from Aug to Nov, 2007

这一现象出现的范围和时间进行了详细的分析。分析结果表明平流层 CO 次峰值现象具有显著的空间分布特性和季节变化特征, 该现象主要出现在高纬地区, 偶尔可扩展到南北纬 50° 附近, 但是相对高纬地区, 次峰现象在中纬地区出现的几率较低。通常这一现象出现于晚冬初春季节, 其中北半球 CO 次峰现象相较南北球 CO 次峰现象持续时间较短、强度较弱。当次峰现象出现时, 相应时期大气中 CO 的纬向平均呈现为悬球状的空间分布特征, 即在极区大气平流层中部 CO 的浓度较高, 而在平流层上部 CO 的浓度较低。

基于 Aura-MLS 卫星观测 CO 资料, 在综合分析了 2005~2010 年间平流层—中间层 CO 浓度变化的基础上, 本文以 2007 年南半球冬春季节的 CO 浓度变化为例, 重点研究了在 CO 次峰结构形成过程中的相关因素, 并深入探讨了各类相关动力传输过程和化学反应过程的作用机制。结果表明, 平流层上部 CO 浓度的急剧减少与纬向风的减弱及逆转、经向输送的增强和大气中 OH 浓度的指数式增加相对应, 而平流层中部 CO 浓度的缓慢变化则与始终维持的西风环流、较弱的经向输送和极低的 OH 浓度相对应。

在进行 CO 次峰现象的成因机制分析中, 本文也同时考虑到 CO_2 光解、 CH_4 氧化等化学反应过程的影响。冬春季节光照的减弱和气温的下降, 使极区的整个化学反应体系活性下降, 因而可忽略 CO_2 光解、 CH_4 氧化对 CO 浓度变化的影响。值得关注的是与来自中间层 CO 一并下传的还有大量的氮氧化物 NO_x (Engel et al., 2006; Siskind et al., 2007), 而 NO_x 在 CH_4 氧化为 CO 的过程中则是不可或缺的。此外, 我们发现中纬大气平流层偶尔也会出现 CO 次峰现象, 而这一现象很可能与极涡的分裂、偏心有关, 同时一些相应的动力过程诸如行星波的破碎、平流层爆发性增温等对 CO 分布变化存在着重要的影响。此外我们也发现南半球和北半球大气中间层向大气平流层传输过程持续时间及强度存在着显著差异, 以及南、北半球大气平流层 CO 空间分布结构也存在着不同, 这些都需要进行更深入的分析。结合更为细致和更长期的卫星观测资料分析结果, 同时结合目前得到广泛应用的中层大气化学传输模式 (田文寿等, 2009), 将非常有利于未来对大气中 CO 浓度时空分布和变化特征与机制, 展开进一步的研究工作。

致谢 本文所用卫星资料分别来自于 NASA 的 Aura-MLS (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura>) 和加拿大 CSA 的 ACE-FTS (<http://www.ace.uwaterloo.ca/index.html>), MERRA 同化资料由 NASA 的 GMAO (<https://gmao.gsfc.nasa.gov/products/>) 提供, 在此对上述机构一并表示感谢。两位匿名审稿人提出的宝贵意见, 使本文增色不少, 谨致以衷心的感谢。

参考文献 (References)

- Allen D R, Stanford J L, Nakamura N, et al. 2000. Antarctic polar descent and planetary wave activity observed in ISAMS CO from April to July 1992 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 665–668.
- Bernath P F, McElroy C T, Abrams M C, et al. 2005. Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (15): L15S01, doi:10.1029/2005GL022386.
- 陈洪滨. 2009. 中高层大气研究的空间探测 [J]. *地球科学进展*, 24 (3): 229–241. Chen Hongbin. 2009. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 24 (3): 229–241.
- Clerboux C, Coheur P F, Hurtmans D, et al. 2005. Carbon monoxide distribution from the ACE-FTS solar occultation measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (16): L16S01, doi:10.1029/2005GL022394.
- Clerboux C, George M, Turquety S, et al. 2008. CO measurements from the ACE-FTS satellite instrument: Data analysis and validation using ground-based, airborne and spaceborne observations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8 (9): 2569–2594.
- de Zafra R L, Muscari G. 2004. CO as an important high altitude tracer of dynamics in the polar stratosphere and mesosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D06105, doi:10.1029/2003JD004099.
- Engel A, Möbius T, Haase H P, et al. 2006. Observation of mesospheric air inside the arctic stratospheric polar vortex in early 2003 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 6: 267–282.
- Fisher M, O'Neill A, Sutton R, et al. 1993. Rapid descent of mesospheric air into the stratospheric polar vortex [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 20: 1267–1270.
- Filipiak M J, Harwood R S, Jiang J H, et al. 2005. Carbon monoxide measured by the EOS Microwave Limb Sounder on Aura: First results [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L14825.
- Hays P B, Olivero J J. 1970. Carbon dioxide and monoxide above the troposphere [J]. *Planet. Space Sci.*, 18: 1729–1733.
- 吕达仁, 陈洪滨. 2003. 平流层和中层大气研究的进展 [J]. *大气科学*, 27 (4): 750–769. Lü Daren, Chen Hongbin. 2003. Advances in middle atmosphere physics research [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 750–769.
- 刘传熙, 王海平, 刘毅. 2009. 2003~2004 年冬季北半球爆发性增温期间极地平流层甲烷、水汽的演变特征 [J]. *自然科学进展*, 19 (3): 425–433. Liu Chuanxi, Wang Haiping, Liu Yi. 2009. Evolution of the methane and water vapor during SSW in 2003–2004 Northern Hemisphere winter [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 19 (3): 425–433.
- Livesey N J, Filipiak M J, Froidevaux L, et al. 2008. Validation of Aura

- Microwave Limb Sounder O₃ and CO observations in the upper troposphere and lower stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D15S02, doi: 10.1029/2007JD008805.
- Lee J N, Wu D L, Manney G L, et al. 2011. Aura Microwave Limb Sounder observations of the polar middle atmosphere: Dynamics and transport of CO and H₂O [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D05110, doi:10.1029/2010JD014608.
- Manney G L, Michelson H A, Santee M L, et al. 1999. Polar vortex dynamics during spring and fall diagnosed using trace gas observations from the Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy instrument [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 18841–18866.
- Manney G L, Dafferet W H, Zawodny J M, et al. 2007. Solar occultation satellite data and derived meteorological products: Sampling issues and comparisons with Aura Microwave Limb Sounder [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D24S50, doi:10.1029/2007JD008709.
- Manney G L, Daffer W H, Strawbridge K B, et al. 2008. The high Arctic in extreme winters: Vortex, temperature, and MLS and ACE-FTS trace gas evolution [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8: 505–522.
- Manney G L, Harwood R S, MacKenzie I A, et al. 2009. Satellite observations and modeling of transport in the upper troposphere through the lower mesosphere during the 2006 major stratospheric sudden warming [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 4775–4795.
- Minschwaner K, Manney G L, Livesey N J, et al. 2010. The photochemistry of carbon monoxide in the stratosphere and mesosphere evaluated from observations by the Microwave Limb Sounder on the Aura satellite [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D13303, doi:10.1029/2009JD012654.
- Pickett H M, Drouin B J, Canty T, et al. 2006. Validation of Aura MLS HO_x measurements with remote-sensing balloon instruments [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (1): L01808, doi:10.1029/2005GL024048.
- Pumphrey H C, Filipiak M J, Livesey N J, et al. 2007. Validation of middle atmosphere carbon monoxide retrievals from the Microwave Limb Sounder on Aura [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D24S38, doi:10.1029/2007JD008723.
- Park M, Randel W J, Emmons L K, et al. 2008. Chemical isolation in the Asian monsoon anticyclone observed in Atmospheric Chemistry Experiment (ACE-FTS) data [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8: 757–764.
- Rienecker M, Suarez M J, Gelaro R, et al. 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications [J]. *J. Climate*, 24: 3624–3648.
- Solomon S, Garcia R R, Olivero J J, et al. 1985. Photochemistry and transport of carbon monoxide in the middle atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42 (10): 1072–1083.
- Shepherd T G. 2007. Transport in the middle atmosphere [J]. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 85: 165–191.
- Siskind D E, Eckermann S D, Coy L, et al. 2007. On recent interannual variability of the Arctic winter mesosphere: Implications for tracer descent [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L09806, doi:10.1029/2007GL029293.
- 田文寿, 张敏, 舒建川. 2009. 中层大气模式的应用及发展前景 [J]. *地球科学进展*, 24 (3): 252–261. Tian Wenshou, Zhang Min, Shu Jianchuan. 2009. The applications and future development of middle atmosphere models [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 24 (3): 252–261.
- Waters J W, Froidevaux L, Harwood R S, et al. 2006. The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote*, 44 (5): 1075–1092.