# HALOE 资料揭示的热带平流层 CH4时空变化特征

郑 彬

中国气象局广州热带海洋气象研究所,广州 510080

摘 要 中层大气微量成分的分布和变化是中层大气研究的重要问题之一,但是长期以来中层大气的资料非常少。卤素掩星试验(HALOE)对中层大气多种微量气体进行观测,形成中层大气多种微量元素的空间分布和时间演变资料组,这是对中层大气微量气体含量资料的极大补充。作者利用 1992~2003 年 HALOE 资料分析热带地区(20°S~20°N)平均的 CH4 的垂直分布和时间演变特征。结果表明:热带平流层 CH4 混合比在平流 层下层有较充分的混合;热带平流层 CH4 混合比的季节变化明显,在平流层中上层以年循环为主,而在平流层下部以半年变化为主;热带平流层 CH4 混合比的年际变化主要有准 2 年和准 5 年振荡。

关键词 卤素掩星试验 热带平流层 CH4

文章编号 1006-9585 (2007) 02-0181-07 中图分类号 P421.32 文献标识码 A

# Temporal and Spatial Features of Tropical Stratospheric CH<sub>4</sub> from the Halogen Occultation Experiment

ZHENG Bin

Guangzhou Institute of Tropical Marine and Meteorology, China Meteorological Adimnistration, Guangzhou 510080

**Abstract** Exploring the characteristics of structure and variations of tracers is one of the most important contents of middle atmosphere studies, which are mostly confined by poor data in the middle atmosphere. The Halogen Occultation Experiment (HALOE) has been carried out to measure some key species in the middle atmosphere and formed data sets offer supplies for the data deficiency. HALOE methane data during the period of 1992-2003 are used to analyze the vertical distribution and time variation of tropical stratospheric methane (20°S—20°N). The results indicate that tropical methane mix sufficiently in the lower stratosphere. Tropical methane behaves as annual cycle in the middle-upper stratosphere and as semi-annual cycle in the lower stratosphere. Interannual variability of tropical stratospheric methane act as quasi-biennial and semi-decadal period.

Key words halogen occultation experiment, tropical stratosphere, methane

# 1 引言

10~100 km 气层的大气通常称为中层大气, 它包括平流层、中间层和热层的低层。这个区域 比较难于观测,只是在近 20 余年才有过系统的研 究。由于这一层大气对诸如太阳活动的变化以及 地面或高空上人为活动排放的物质等外界扰动都 极为敏感,所以对中层大气的研究受到广泛重视。 中层大气研究的核心内容之一就是平流层 O<sub>3</sub>的分 布和变化<sup>[1~3]</sup>,因此,影响 O<sub>3</sub>光化反应进程的微 量成分,如 NO、NO<sub>2</sub>、Cl、ClO 和 OH 等也受到

收稿日期 2005-11-30 收到, 2006-12-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40505019

作者简介 郑彬,男,1976年出生,博士,副研究员,主要从事季风、海气相互作用和中层大气研究。E-mail: zbin@grmc.gov.cn

极大的关注<sup>[4~7]</sup>。而  $H_2O$  和  $CH_4$  作为重要的温室 气体和示踪气体,同样得到重视。平流层是对流 层微量气体的重要汇区,对流层产生的许多重要 微量气体 (CFCs,  $CH_4$ ,  $N_2O$ 等) 都输送到平流 层,它们在平流层经过光化反应后形成的自由基 可以与 O<sub>3</sub>、水汽等其他微量气体发生反应。对流 层向平流层输送的最主要的途径是通过对流,而 从气候角度看,对流发生的主要区域是热带,它 不仅包括了全球主要的季风区, 也是热带辐合带 (ITCZ) 活跃的地区。因此,清楚地了解热带平 流层微量气体的时空分布特征,可以为进一步弄 清热带平流层微量气体的分布特征与热带夏季风 活动的关系。据统计,平均每年约有 40 Tg 的 CH<sub>4</sub>从对流层输送到平流层<sup>[8]</sup>,它对平流层的热 力和化学过程有重要影响,因此很多学者对平流 层 CH<sub>4</sub> 的分布和时间变化进行了研究。例如, Randel 等<sup>[9]</sup>利用 1991~1997 年的卤素掩星试验 (Halogen Occultation Experiment, HAOLE) 资 料,研究了平流层 CH4 和水汽的季节循环和准两 年周期振荡(QBO)。他们指出,赤道上空 CH<sub>4</sub> 混合比有明显的半年周期振荡 (SAO), 而且前半 年比后半年强的多(这是由于北半球冬季相对于 南半球有更强的副热带波驱动)。Dunkerton<sup>[10]</sup>利 用主成分分析方法揭示平流 CH<sub>4</sub>、水汽和 O<sub>3</sub>的主 要模态,包含SAO、年循环、QBO和次2年变化 (Subbiennial variation)。虽然 Randel 等<sup>[9]</sup> 和 Dunkerton<sup>[10]</sup>都分析了 CH<sub>4</sub> 的 QBO, 但是并没有 研究其振幅和周期的时间演变。本文不仅分析了 热带(20°S~20°N)平流层CH4混合比的垂直分 布特征,还讨论了其季节变化,并分析了 CH<sub>4</sub>的 年际尺度变化(主要是 QBO)及其随时间演变的 可能原因。

## 2 HALOE 简介

对中层大气微量成分的分析离不开观测,但 由于高度的限制以及中层本身稀薄、中性(离子 成分少,主要是中性粒子)的特点,使得中层大 气的观测非常困难。20世纪70年代以前,主要采 用气球探空对平流层底层的气象要素和个别微量 成分进行观测,极少使用火箭探空,因此未能对 该层大气成分及特性有较整体的了解。20世纪70

年代以后,O<sub>3</sub>探空仪开始用来测量大气O<sub>3</sub>的垂直 分布和总含量,并且气象卫星观测中层大气微量 气体也已取得成效。1979年,载于卫星上的 SAGE I (Stratosphere Aerosol Gas Experiment) 在工作了2年多后,新一代的 SAGE II 载于 ERBS (The Earth Radiation Budget Satellite) 7. 星,于1984年10月发射,主要用于测量平流层 O3、气溶胶、NO2和水汽。另外, TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 装置载于 Nimbus-7和 Meteor-3卫星, 1978年10月发射升空, 并 于当年11月提供有效的O<sub>3</sub>总量观测数据, 它一 直工作了 16 年。ADEOS TOMS 于 1996 年 8 月 17日发射升空,并提供数据直到1997年6月29 日; 1996年7月2日发射了 Earth Probe TOMS, 一直提供实时数据至今。这些卫星资料为了解中 层大气成分提供了很好的条件。

相对于其他星载中层大气试验, HALOE 进 行的较迟,它装置在高层大气研究卫星(Upper Atmosphere Research Satellite, UARS) 上, 于 1991年9月12日发射, 1991年10月11日开始 工作至今并发布各种微量气体垂直分布的资料。 HALOE 采用太阳掩星法测量大气微量气体和气 溶胶的垂直分布。即当太阳相对于某地是刚升起 或落下时, HALOE 测量来自太阳方向并与大气 相切高度上的太阳辐射,再由此反演该地微量气 体与气溶胶消光系数等的垂直分布。它可同时测 量大气 O<sub>3</sub>、HCl、HF、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>O、NO、NO<sub>2</sub>、 气溶胶消光和温度等的垂直分布。其水平测量范 围在 80°S~80°N, 垂直测量范围从 15 km 到 60~ 130 km (不同的测量气体其测量的高度也不同), 分为 271 层; 垂直分辨率很高, 在 100 km 以下各 层垂直间距大约为400~500 m, 100 km 以上各层 垂直间距逐渐增大。不同气体其观测高度范围不 完全相同,例如,NO的观测范围大约从10~130 km, NO<sub>2</sub>的观测范围大约是 15~55 km。HA-LOE 试验提供两种资料,分别是日出(sunrise) 和日落(sunset)资料,它们之间是有区别的。日 落资料体现了白天光化反应的作用,而日出资料 则没有。利用它们可以研究微量气体浓度以及相 关光化学的日变化。

Russell 等<sup>[11]</sup>详细介绍了 HALOE 的观测原 理,并将 HALOE 观测资料与 ATOMS (Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy) 观测资料对 比,结果非常吻合。Hervig 等<sup>[12]</sup>的分析结果表 明,HALOE 资料在平流层的随机和系统误差小 于 15%。Park 等<sup>[13]</sup>也将 HALOE 的 CH<sub>4</sub>直接与 相关资料进行对比,并利用 HALOE 观测的其他 微量气体 (HF 和气溶胶) 检测其内部的一致性, 以验证 HALOE 的 CH<sub>4</sub> 资料的有效性。结果表 明,估计的 0.3~50 hPa 区域总误差(包括系统 和随机误差)小于 15%,精度大于 7%。

本文将利用 HALOE 观测的日出时 CH<sub>4</sub> 混合 比的季平均资料(版本号 19,时间长度 1992~ 2003年,时间间隔 1季)分析其在热带平流层  $(20^{\circ}S\sim20^{\circ}N, 100\sim1 hPa)$ 的垂直分布和时间演 变特征。

## 3 结果分析

CH4是重要的温室气体,它和 CO2 一样,吸 收来自地面的长波辐射,同时放射长波辐射,因 此平流层中的 CH4能使对流层和平流层底层的温 度增高;同时,使平流层中上层的温度下降。另 一方面,CH4在平流层的光化分解和化学反应会 吸收或放出热量,因此,平流层中 CH4的含量对 全球温度结构的形成起重要的作用。另外, CH<sub>4</sub> 对全球奇氧(包括基态 O 原子、激发态 O 原子和 O<sub>3</sub>)的光化学也起重要的作用。首先, CH<sub>4</sub>的增 加将使 OH 增加(它将破坏奇氧),从而 NO<sub>2</sub>相对 减少和 ClO 的增加(这两种成分能催化 O<sub>3</sub> 的光化 学反应)。同时, CH<sub>4</sub>的增加还将减少 Cl 原子的 浓度,并通过 Cl 与 CH<sub>4</sub>的反应而使 HCl 增加。 与之相联系的 O<sub>3</sub>总量的改变和变化幅度取决于以 上反应过程中每一种的物质浓度。反应过程如下:

> $CH_4+O$  (<sup>1</sup>D)  $\rightarrow CH_3+OH$ ,  $OH+NO_2+M\rightarrow HNO_3+M$ ,

 $ClO+NO_2+M\rightarrow ClONO_2+M$ ,

 $CH_4 + Cl \rightarrow CH_3 + HCl.$ 

因此搞清楚 CH<sub>4</sub> 在平流层中的分布特征是很 有必要的。平流层的 CH<sub>4</sub>分布在很大程度上取决 于源的排放和汇的消耗,但是动力对 CH<sub>4</sub>的输送 作用也是影响平流层 CH<sub>4</sub> 浓度的一个重要因 素<sup>[14,15]</sup>。

#### 3.1 CH4的垂直分布特征

HALOE 对 CH<sub>4</sub>的垂直观测范围大约为 15~ 80 km,其中 70 km 以下有较高的精度。本文主要 分析平流层 100~1 hPa (大约 18~50 km)的 CH<sub>4</sub>垂直分布。图 1a 显示的是热带地区 (20°S~



图 1 热带平流层垂直分布:(a) HALOE 的 CH4混合比;(b) ECMWF 的气压垂直速度

Fig. 1 Tropical vertical profiles of (a) CH4 mixing ratio from HALOE, (b) vertical pressure velocity from ECMWF

20°N) 平均的 CH<sub>4</sub> 混合比的垂直分布。从图中可 以看到, CH<sub>4</sub>混合比在整个平流层都是随高度增 加而减小的,这一点与已得到的普遍认识一致。 值得注意的是: CH<sub>4</sub>混合比在平流层下层的减小 速度非常缓慢,平均约每百帕减小  $3.29 \times 10^{-9}$ 混 合比浓度; 而 CH<sub>4</sub>混合比在平流层中上层减小的 非常快,平均的浓度变化速率约为  $5.58 \times 10^{-8}$ hPa<sup>-1</sup>。后者约为前者的 15 倍。

CH4混合比的随高度减小速率的不一致表明: 平流层下层,热带地区的 CH4 有较充分的混合, 而平流层中上层的 CH<sub>4</sub> 混合较缓慢。这一点在垂 直速度的变化上也可以得到证明,如图 1b。图 1b 是从欧洲中期数值预报中心 (ECMWF) 资料计 算得到的热带地区平均气压垂直速度的分布,因 此负值表示了垂直等压面向上的运动。从图 1b 中 可以看出,在 20 hPa 以下的平流层低层,垂直速 度相对较大(虽然变化很大);而在平流层的中上 层,垂直速度远小于平流层下部,接近0。平流层 中的 CH<sub>4</sub>属于长寿命气体,其分布在很大程度上 取决于动力输送。垂直速度大的地方将有较小的 输送时间尺度,因此该处上层的混合比将在更短 的时间内接近下层的混合比值。由此可知,在平 流层的下部,由于有较大的垂直速度,所以引起 的 CH4 混合比的垂直混合也大; 平流层中上层则 相反,垂直混合缓慢。

#### 3.2 CH<sub>4</sub>的季节变化特征

季节变化反映了季节尺度的变化特征,包含 了年循环(一个周期约为4个季节)和半年振荡 (一个周期约为2个季节)。图2即是热带平流层 CH<sub>4</sub>混合比距平多年平均的垂直分布随时间(季 节)的变化。图中显示,在平流层的中上层, CH4混合比有明显的年循环:夏半年(这里指5~ 10月,下同)的混合比浓度较小,极小中心在 7月的3hPa等压面上; 而冬半年(这里指11月 至次年4月,下同)相对较大,极大中心在1月 的2 hPa高度。同时还可以看到,热带平流层 CH<sub>4</sub> 混合比的年循环并不对称。正异常的绝对极值较 大,并且位置也略高。这种不对称可能是由于季 节变率向下传播中的不对称引起的。由图2可以 看到,年循环有一个从上向下传播的过程,其中 在夏半年的传播速度较慢,从1~10 hPa用了约 4个月时间。而冬半年从1~10 hPa 用了不到3



图 2 热带平流层 CH<sub>4</sub>混合比垂直分布的季节变化(单位: 10<sup>-8</sup>混合比浓度,等值线间隔 2×10<sup>-8</sup>混合比浓度) Fig. 2 Seasonal variabilities of tropical stratospheric methane (units: 10<sup>-8</sup> mixing ratio, with interval 2×10<sup>-8</sup>)

个月。

另外, 在平流层的下部(主要在 60~30 hPa), CH<sub>4</sub>混合比浓度还表现出半年的振荡周期 (SAO)。3~7月为一个周期,8月至次年2月为 一个周期。与平流层中上层年循环不同的是, CH4半年振荡与对流层顶和对流层上层关系密切, 是平流层和对流层交换的结果。Randel 等<sup>[9]</sup>的研 究就指出了平流层低层的 CH4 季节变化和垂直速 度场很相似,他们认为由于 CH4 垂直分布具有很 强的层结性,因此这种匹配也是合理的。图 3 给 出了 200~100 hPa 热带地区垂直速度的季节变化 (资料来源于 ECMWF),结果确实表明对流层上 部和对流层顶的垂直速度具有半年振荡的特征, 而且超前于 CH4 的季节变化。其中 2 月是垂直速 度的一个极小值,对应着图 2 中 4 月 CH<sub>4</sub>的一个 极小值;而4月垂直速度的一个极大值则对应着 图 2 中 7 月的一个极大值。图 3 中 7、8 月垂直速 度的另一个极小值对应着图 2 中 10 月 CH4 的一个 极小值,12月的垂直速度极大值则对应1月的 CH<sub>4</sub>极大值,而这种超前的关系体现了大致的输 送时间尺度(即月和季之间)。由此可见,低平流 层 CH<sub>4</sub>的半年振荡确实与对流层顶附近的垂直运 动有密切联系。虽然垂直速度的几个极值点与  $CH_4$ 半年振荡的极值点对应得较好,但从图 3 还 可以看到垂直速度在冬半年的振荡偏弱,因此作 者认为它的季节变化只能是部分解释 CH<sub>4</sub>的半年 周期变化,而剩余环流<sup>[17]</sup>可能是另一个成因。另

外可以看到,半年周期的振幅比年循环的振幅小 的多。这与第1节讨论结果是一致的。虽然平流 层下部的 CH<sub>4</sub>混合比较大,但是由于低层混合的 较充分,最终导致了 CH<sub>4</sub>混合比的季节变率振幅 偏小。

Randel 等<sup>[9]</sup>在 1998 年也分析了 CH<sub>4</sub> 的季节



图 3 200~100 hPa 热带垂直速度的季节变化

Fig. 3  $\,$  Seasonal variation of the tropical vertical pressure velocity at 200—100 hPa  $\,$ 

变化,他们的结果与本文有几点相同之处:首先, 二者的季节变化在 3 hPa 附近都有高值中心;另 外,高层有比低层更大的季节变率。不同之处主 要是在平流层高层,其中 Randel等<sup>[9]</sup>的结果是 SAO,而本文为年循环。其可能原因有二,其一 是方法差异。Randel等<sup>[9]</sup>对资料的纬向平均是沿 着等位涡面,而本文是沿着等压面;其二,Randel等<sup>[9]</sup>只是分析赤道上的结果,而本文是 20°S~ 20°N 的平均结果。另外,差异可能并不是来自月 平均和季平均的区别,理由是施春华<sup>[16]</sup>利用月平 均资料并采用与本文相似的方法,得到 2 hPa 热 带 CH<sub>4</sub> 的显著周期变化依然是年循环而不是 SAO。

#### 3.3 CH4的年际变化特征

在去除多年平均的季节变化之后,分析热带 平流层(100~1 hPa 平均)CH4混合比的年际变 化特征。本文采用小波分析方法,得到图 4a,图 中等值线显示了CH4混合比的 Morlet 小波变换的



图 4 热带平流层 CH4混合比的 (a) Morlet 小波变换时间一周期 (等值线是小波功率谱,弧线外部阴影区为边界效应产生的不可信区域,弧线内部阴影区为通过 0.01 信度的区域)和 (b) 变化 (去除多年平均的季节变化)

Fig. 4 (a) Time-period cross section of tropical stratospheric methane by Morlet wavelet transform, isolines denote wavelet power spectrum, and periods greater than arc are subject to edge effects and the value in the region are unlikely. The region in arc is shaded when the power spectrum exceed 99% significance level; (b) tropical stratospheric methane departing from mean seasonal variation 功率谱。可以看到 CH<sub>4</sub>混合比年际变化的主要周 期有准2年和准5年,其中准2年变化的振幅大 于准5年周期。关于CH4的QBO现象已有一些工 作<sup>[9,10]</sup>,但尚未有关于 CH<sub>4</sub>的 QBO 周期和振幅变 化趋势的研究。从图 4a 可见, CH4 准 2 年周期的 振幅有明显减小的趋势,这与图 4b 中 CH<sub>4</sub>变化幅 度减小是一致的。我们知道, 1991年的皮纳图博 (Pinatubo) 火山爆发,对平流层微量气体造成很 大的影响,此后的1992年有更多CH4等微量气体 聚集在热带平流层库(Tropical Stratospheric Reservior), 这就可能增大了 CH<sub>4</sub> 准 2 年变化的振 幅。之后,由于 CH<sub>4</sub>浓度逐渐趋于背景值,其 QBO 振幅也就变得越来越小。这可能是 CH4 的 QBO 振幅减小的一个原因。此外,准2年变化的 周期也呈明显的减小趋势。图中显示通过信度检 验的区域主要在准2年周期上,而准5年变化则 没有通过检验。由此可知,热带平流层中 CH<sub>4</sub>混 合比最显著的年际变化是准2年振荡。

### 4 小结

利用 HALOE 观测的 1992~2003 年季平均 CH4资料,分析了热带平流层 CH4的垂直分布特 征及其季节和年际变化,结果表明:

(1) 热带平流层 CH4 混合比随高度减小,在 平流层低层的减小速率远小于平流层中高层。这 表明热带平流层低层的混合远比中高层充分。

(2) 热带平流层 CH<sub>4</sub> 混合比有显著的年循环 和半年振荡。在平流层中高层以年循化为主,而 且并不对称,这与年循环的向下传播的季节不均 匀有关。这与 Randel 等<sup>[9]</sup>的 SAO 并不一致,其 原因可能有两个,其一: Randel 等<sup>[9]</sup>对资料做纬 向平均是沿着等位涡面,而本文是沿着等压面; 其二: Randel 等<sup>[9]</sup>只是分析赤道上的结果,而本 文是 20°S~20°N 的平均结果。在平流层低层,主 要是半年振荡,而且振幅比年循环小的多。

(3) 热带平流层 CH4 的年际变化以准 2 年和 准 5 年为主。其中又以准 2 年变化最显著,而且 周期和振幅都有明显的减小趋势。因此,CH4 混 合比年际变化振幅的衰减也主要体现在准 2 年周 期振幅的减小上,这可能与皮纳图博火山爆发后 的影响有关。 **致**谢 HALOE 资料从 http://haloedata. larc. nasa. gov下载,欧洲中心资料从 ECMWF 资料服务器上下载, 作者在此表示感谢。

#### 参考文献 (References)

- [1] 邹捍, 郜永祺. 60~70°S 臭氧总量的 QBO 和 ENSO 信号. 气候与环境研究, 1997, 2 (1): 61~70
  Zou Han, Gao Yongqi. QBO and ENSO signals in total o-zone over 60—70°S. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1997, 2 (1): 61~70
- [2] 季崇萍,邹捍,周立波.青藏高原臭氧的准两年振荡.气候与环境研究,2001,6(4):416~424
  Ji Chongping, Zou Han, Zhou Libo. QBO signal in total o-zone over the Tibet. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001,6(4):416~424
- [3] Chen Yuejuan, Zheng Bin, Zhang Hong. The features of ozone quasi-biennial oscillation in tropical stratosphere and its numerical simulation. Adv. Atmos. Sci., 2002, 19 (5): 777~793
- [4] 郑彬,陈月娟,简俊.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 I. 资料分析.大气科学,2003,
  27 (5):821~833
  Zheng Bin, Chen Yuejuan, Jian Jun. Quasi-biennial oscilla-

tion in NO<sub>x</sub> and relationship to O<sub>3</sub> QBO. part I: Data analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (5):  $821 \sim 833$ 

[5] 郑彬,陈月娟,张弘.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.数值模拟.大气科学,2003, 27 (6):1007~1017
Zheng Bin, Chen Yuejuan, Zhang Hong. Quasi-biennial oscillation in NO<sub>x</sub> and relationship to O<sub>3</sub> QBO. part II: Numerical experiment. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, 27 (6): 1007~1017

[6] 施春华,陈月娟,郑彬.平流层大气中HCl分布特征及其
 与臭氧分布的关系.中国科学技术大学学报,2003,33
 (6):701~708

Shi Chunhua, Chen Yuejuan, Zheng Bin. Analysis of the distribution in haloe hcl data in the stratosphere and its relationship with ozone. Journal of University of Science and Technology of China (in Chinese), 2003, **33** (6):  $701 \sim 708$ 

[7] 郑彬.中层大气微量气体的分布和输送研究.中国科学技 术大学博士学位论文.2003 Zheng Bin. Studies on the distributions and dynamical transportation of tracers in the middle atmosphere. Ph. D.

transportation of tracers in the middle atmosphere. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology of China. 2003

[8] 王明星,张仁健,郑循华.温室气体的源与汇.气候与环

境研究, 2000, 5 (1): 75~79

Wang Mingxing, Zhang Renjian, Zheng Xunhua. Sources and sinks of green house gases. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (1): 75~79

- [9] Randel W J, Wu F, Russell J M III, et al. Seasonal cycles and QBO variations in stratospheric CH₄ and H₂O observed in UARS HALOE data. J. Atmos. Sci., 1998, 55: 163~ 185
- [10] Dunkerton T J. Quasi-biennial and subbiennial variations of stratospheric trace constituents derived from HALOE observations. J. Atmos. Sci., 2001, 58: 7~25
- [11] Russell J M III, Gordley L L, Park J H, et al. The Halogen Occultation Experiment. J. Geophys. Res., 1993, 98 (D6): 10777~10797
- Hervig M E, Russell J M III, Gordley L L, et al. Aerosol effects and corrections in the Halogen Occultation Experiment. J. Geophys. Res., 1995, 100: 1067~1079
- Park J H, Russell J M III, Gordley L L, et al. Validation of Halogen Occultation Experiment CH<sub>4</sub> measurements from the UARS. J. Geophys. Res., 1996, 101 (D6): 10183~10204
- [14] Zheng Bin, Shi Chunhua, Chen Yuejuan. Antisymmetric

transport of middle stratospheric methane with respect to the equator. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51** (14):  $1761 \sim 1765$ 

- [15] 郑彬,施春华,陈月娟.中国平流层 CH<sub>4</sub>的分布特征和季节变化.高原气象,2006,25 (4):609~615
  Zheng Bin, Shi Chunhua, Chen Yuejuan. Distribution Features and Seasonal Variation of Stratospheric CH<sub>4</sub> over China (in Chinese). *Plateau Meteorology*, 2006, 25 (4):609~615
- [16] 施春华.平流层微量气体变化趋势及其化学过程的研究. 中国科学技术大学博士学位论文.2006
   Shi Chunhua. Study on the trends and chemical process of trace gases in stratosphere. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology of China. 2006
- [17] 陈权亮.Brewer-Dobson 环流及其对平流层微量气体输送的研究.中国科学技术大学博士学位论文.2006 Chen Quanliang. Study on the Brewer-Dobson circulation and its transports for trace gases in stratosphere. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology of China. 2006