

利用 HALOE 资料分析中层大气中 水汽和甲烷的分布特征

毕云 陈月娟 许利 邓淑梅 周任君

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

摘 要 利用 1991 年 12 月至 2004 年 5 月的 HALOE 资料, 分析了中层大气中微量气体水汽和甲烷的垂直和水平分布特征。垂直分布特征是: 水汽混合比在对流层顶和平流层底达到极小值(此极小值区被称为湿层顶), 平流层里水汽混合比随高度增加, 在平流层上层和中间层低层混合比出现明显的扰动, 在中间层顶再次达到极小值, 向上混合比又随高度增加。甲烷混合比从 100 hPa 附近向上混合比一直减少。经向分布特征主要表现为: 平流层中下层水汽混合比低值区在热带地区上拱, 水汽混合比自低纬向高纬递增; 而该气层甲烷混合比则是高值区在热带地区上拱, 甲烷混合比自低纬向高纬递减。在低平流层副热带 $20^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$ ($20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$) 附近二者混合比水平梯度相对偏大。平流层中上层二者等值线在北半球夏季变成双峰形势, 北半球冬季仍是单峰形势。中间层二者都主要表现为冬、夏季分布形势相反。在北半球夏季 30°N , 平流层中下层水汽和甲烷混合比纬向梯度很小, 对流层上层以及中间层二者混合比纬向梯度明显。

关键词 中层大气 水汽 甲烷

文章编号 1006-9895 (2007) 03-0440-09

中图分类号 P421

文献标识码 A

Analysis of H_2O and CH_4 Distribution Characteristics in the Middle Atmosphere Using HALOE Data

BI Yun, CHEN Yue-Juan, XU Li, DENG Shu-Mei, and ZHOU Ren-Jun

School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract The HALOE observational data from December 1991 to May 2004 are used to analyze the vertical and horizontal distributions of H_2O and CH_4 in the middle atmosphere, especially in the upper stratosphere and mesosphere. For a more convenient comparison, the objective analyses are made on the HALOE data and $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ grid data are obtained (covering $70^{\circ}\text{S}-70^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\text{W}-180^{\circ}\text{E}$). The vertical profiles of H_2O and CH_4 mixing ratio at various latitudes and longitudes as well as in the different years are given, and the latitude-altitude cross section and longitude-altitude cross section of the H_2O and CH_4 mixing ratio are also presented in this paper. The results show that the H_2O mixing ratio decreases from the upper troposphere to the tropopause quickly and reaches a minimum near the tropopause (the minimum is called as “hygropause”); and then it increases with height in the lower-middle stratosphere, while it is disturbed significantly in the upper stratosphere and lower mesosphere; it decreases with altitude again and reaches another minimum near the mesopause; the profiles of H_2O mixing ratio for the different latitudes, various longitudes and in the different years are similar, except that some difference is exist in mixing ratio amount and the altitudes of the hygropause of different latitudes are not the same. The characteristic of vertical distribution of CH_4 shows that it always decreases with height in the middle atmosphere. The profiles for the different latitudes,

various longitudes and in the different years are similar, but the mixing ratio values are somewhat different. The meridional distribution shows that the low value zone of H₂O mixing ratio bulges upward in the tropical low-middle stratosphere, the H₂O mixing ratio increases from low latitudes to high latitudes. In contrast, the high value zone of the CH₄ mixing ratio bulges upward in the same place, the CH₄ mixing ratio decreases from low latitude to high latitude. Relatively strong horizontal gradients are seen in the subtropical lower stratosphere near 20°N–30°N and 20°S–30°S. Both the H₂O and CH₄ mixing ratio contours change into double-peaked pattern in the upper stratosphere in JJA, but they remain a single peak in DJF. Approximately opposite patterns appear in DJF and JJA both for H₂O and CH₄ in the lower-middle mesosphere; the high values of both H₂O and CH₄ mixing ratio occur in north high latitude in JJA, while the high values in DJF occur in south high latitude. The minimum of H₂O and CH₄ mixing ratio in DJF is over arctic in the middle-upper mesosphere, however they are near Antarctic in JJA. Longitudinal gradients of the two trace gas as near 30°N in JJA are all small in the lower-middle stratosphere, but they are large in the upper troposphere and mesosphere.

Key words the middle atmosphere, H₂O, CH₄

1 引言

全球中层大气(10~100 km 高度, 包括平流层、中间层和热层的底层)温度的变化是地球气候变化的重要的、不可分割的部分。有关研究^[1]表明, 全球气候变暖主要是由于大气中温室气体(如二氧化碳、甲烷等)的增加, 使得近地面和对流层大气的温度升高, 但在平流层以上的大气温度是下降的。大气温度垂直结构的变化, 必然会影响到大气中的重力波、行星波的传播, 使得对流层和平流层之间的质量、能量和动量交换发生变化。为了正确评估中层大气温度的变化, 首先要了解中层大气中温室气体的分布和变化趋势, 以及它们对气候影响的过程和机理。研究表明^[2~5], 中层大气中水汽和甲烷在该层的辐射和光化学作用中是很活跃的成分, 尽管它们的含量不多, 但它们在温度变化中也起着重要的作用。平流层水汽变化是地面温度和热带对流层顶温度变化的反馈, 通过水汽的分布和变化特点可以追踪大气的运动(例如平流层和对流层的交换^[6]、Brewer-Dobson 环流等)。水汽是中层大气氢氧根的来源, 而氢氧根在许多化学反应中是重要的, 能引起臭氧的损耗。平流层水汽增加的原因一直处在争论之中, 研究中层大气水汽的分布和变化对目前一系列的科学问题是重要的。在世界气候研究计划(WCRP)中设立的一个平流层过程及其对气候的作用计划(SPARC)的评估报告里, 就明确指出温度、臭氧和水汽是气候变化在平流层的指示器。平流层甲烷很容易被氧化生成水汽分子, 因而影响水汽的变化。它本身也可以与激发

态的氧原子发生反应生成氢氧根, 进而影响臭氧的平衡。甲烷在中层大气中也是很好的示踪气体。总之, 中层大气中水汽和甲烷都是重要的温室气体, 影响着地-气系统的辐射平衡过程。因此, 在中层大气辐射过程及其对气候影响的研究中, 除了要分析臭氧之外, 还需要分析水汽和甲烷的分布特征。

因天气预报的需要, 人们对对流层下层水汽分布和变化的观测和了解较多, 但由于常规观测很难测得较高高层的水汽, 因此 500 hPa 以上特别是中层大气中水汽的分布和变化我们还不是很清楚。甲烷是重要的温室气体之一, 近年来也颇受人们关注, 但很多监测资料仅限于近地面^[7], 这对于我们的研究是不够的, 因而也迫切需要了解它在中层大气中的分布和变化情况。国外对中层大气中水汽和甲烷的观测和分析开展得较早, 目前已有很多研究成果, 数值模拟也早已开展起来。在 2000 年的 SPARC 总结报告^[4]里, 对 1999 年前国外对上对流层和平流层的水汽观测和研究的现状进行了详细的总结, 该文中除详细介绍平流层水汽的探测方法和对各种观测资料的质量进行对比外, 还给出了 HALOE 观测的平流层水汽的垂直经向分布, 讨论了它的季节变化、季节内变化、瞬变特征以及年际变化和长期变化趋势。Randel 等^[8]也利用 HALOE 资料分析平流层甲烷和水汽的季节变化和 QBO 特征。Dunkerton^[9]利用旋转主分量方法分析了平流层甲烷、水汽和臭氧的分布和准两年以及次两年变化特征。1995 年, Oltmans 和 Hoffmann^[10]分析了 1981~1994 年科罗拉多博尔德(Boulder)上空探空气球测得的水汽资料, 指出该地区上空平

流层中水汽每年增加 0.5% 的趋势。而 Forster 和 Shine^[11] 用 FDH 模式模拟到水汽的这种变化在 40°N 上空 15~20 km 的气层会造成超过 0.2 K/10 a 的降温。这个降温率高于各种温室气体引起的总的降温率（一般约为 0.1 K/10 a），而约为平流层臭氧减少引起的降温率的 20%~30%。Dlugokencky 等^[12] 分析表明，20 世纪 80~90 年代，全球平均的甲烷增加量约为 $0.01 \times 10^{-6}/\text{a}$ ，但 90 年代增加率明显偏低。这些研究结果增加了我们对平流层水汽和甲烷的了解。但国外对水汽的分析大部分侧重于对流层上层和平流层下层，对平流层上层和中间层的分析偏少，而在国内这方面的研究就更少。本文利用 HALOE 资料，分析这两种微量气体从对流层上层直至中间层的分布特征，为研究整个中层大气的辐射、光化学以及运动过程提供依据。

2 HALOE 资料简介

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^[13]，它可以测量从 5 km 到 60~130 km 高度范围内的 HF、CH₄、HCl、O₃、NO_x、H₂O 等气体和温度的垂直廓线和气溶胶的消光系数。卤素掩星实验是利用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，用探测器记录接收到的太阳辐射，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 提供的资料其纬向测量范围为 80°S~80°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 450 m，100 km 以上各层垂直间距逐渐增大，到 130 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，水汽的观测范围大约是 5~88 km，甲烷的观测范围大约是 6~84 km。HALOE 资料经过多年的运行及与已有的陆基探空资料和其他卫星资料对比后，在国外已得到广泛应用。SPARC^[4] 已将它列为研究水汽的重要资料之一。在国内，气象工作者^[14~18] 也曾用它进行过 O₃、NO_x、HCl 的研究，效果不错。所以本文也用它来研究水汽和甲

烷的分布。本文使用的 HALOE 资料是从网上下载的 1991 年 10 月~2004 年 6 月的水汽和甲烷的观测资料，共有 44292 次日出时的观测。在文献 [4] 中对 HALOE 资料与地基探测、气球探测和飞机探测资料以及其他卫星资料进行了详细对比。在 1~10 hPa 高度层内，HALOE 与 10 种资料作了对比，相差值在 -5%~17% 之间（其中有 8 种资料与 HALOE 资料相差在 10% 以下），平均为 +5%。在 10~50 hPa 高度层内，HALOE 与 11 种资料作了对比，相差在 -8%~16% 之间（其中只有 1 种资料与 HALOE 资料相差超过 10%），平均为 3%。在 60~100 hPa 高度层内，HALOE 与 15 种资料作了对比，相差在 -9%~20% 之间，平均为 6.5%。总的来说，HALOE 观测得到的水汽混合比在多数情况下比别的观测资料小一些。但在对流层上层（特别是在 200 hPa 以下）HALOE 资料的观测误差偏大，而且缺测较多。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，将 1991 年 10 月~2004 年 6 月日出时的观测资料分别进行客观分析，把卫星观测资料按季节插值到 5°×5° 的网格点上，然后再进行各种分析。插值方法采用郑彬^[19] 使用的方法。简单地说，就是选取格点四周附近的 4~8 个 HALOE 观测点的资料，根据它们与格点之间的距离给以适当的权重，进行加权插值。在文献 [19] 中给出了用插值的数据绘制的 O₃ 垂直-经向剖面图，并与 HALOE 网站给出的同一时间的 O₃ 垂直-经向剖面图进行比较，结果非常吻合。我们在做水汽和甲烷的分析时，也将插值的数据与 HALOE 观测数据做过比较，在 200 hPa 以上也吻合得很好。在 200 hPa 以下，由于观测误差大一些，更因为不同的点其观测的起始高度有时会不同，在 200 hPa 以下有时会缺测，这样就会影响插值效果。因此，在下面的分析中，我们只用 200 hPa 以上的资料。

3 水汽和甲烷的垂直分布

3.1 水汽的垂直分布特征

在对流层，水汽含量随着高度的增加而迅速减少，在近地面水汽混合比约为 10^{-2} (海上) 到 10^{-4} (沙漠) 之间变化，到对流层上层 200 hPa 附近可达

10^{-5} , 但到了平流层水汽混合比不是一直减少的。图 1 给出了不同经度、不同纬度和不同年份三种不同情况的水汽混合比的垂直廓线。图 1a 是 1995 年夏季赤道地区不同经度上和沿纬圈平均的水汽混合比垂直廓线。可以看出, 在赤道地区从对流层上层至对流顶水汽混合比快速减少, 在 80 hPa 附近达到极小值, 约为 3×10^{-6} , 从 80 hPa 附近向上, 水汽混合比随高度增加, 在平流层上层 (1 hPa) 附近到中间层低层, 水汽混合比随高度的变化很激烈, 出现很明显的扰动。从中间层中部 (约 0.02 hPa) 向上水汽混合比随高度减少, 在中间层顶附近达到另一个极小值。从中间层顶向上水汽混合比又开始增加。不同经度上水汽混合比在平流层中层和下层分布基本一致, 在中间层中上层它们的垂直分布也很相似。但在平流层上层和中间层下层的扰动区, 不同经度上水汽混合比数值有较大的差异。图 1b 是 1995 年北半球夏季不同纬度沿纬圈平均的水汽混合比垂直廓线。表明不同纬度水汽混合比随高度的变化总体一致, 但不同纬度带水汽混合比的垂直分布有一定的差异, 在 100 hPa 以下随着纬度的增加水汽混合比不断减小。不同纬度水汽混合比在对流顶都达到极小值, 但极小值所在高度明显不同, 赤道纬度地区这个极小值最小, 所在位置高于其他纬度。在中间层顶附近不同纬度极小值所在高度也有差别, 30°N 和 60°N 所在位置高一些。图 1c 是 1994、1998、2000、2002 年沿 35°N 纬圈平均的水汽混合比垂直廓线。表明在不同年份虽然廓线特征相似, 但混合比数值有一定的差异, 特别是 2002 年在对流层顶到平流层下层水汽混合比偏小, 而在平流层中层偏大, 在中间层也偏小。平流层和中间层的水汽混合比垂直廓线特征与温度廓线相似。可能因为水汽含量不但与对流运动、湍流交换、化学过程有关, 还与温度分布有关。湿空气到达对流层顶时, 因为对流顶温度低, 空气穿越对流顶时被脱水, 因而到达平流层的水汽要少得多, 在 100~80 hPa 附近达到极小值。在对流层顶平流层底的这个水汽混合比的极小值区曾多次被探空气球现场观测到, 如 Kley 等^[20] 1978 年在美国怀俄明 Wyoming (41°N) 和巴西 Quixeramobim (5°S) 都观测到这个极小值区的存在。这个水汽的极小值区被称为湿层顶 (hygropause)^[2]。上面给出的由 HALOE 得到的结果, 无论是湿层顶的位置还是平流层中下

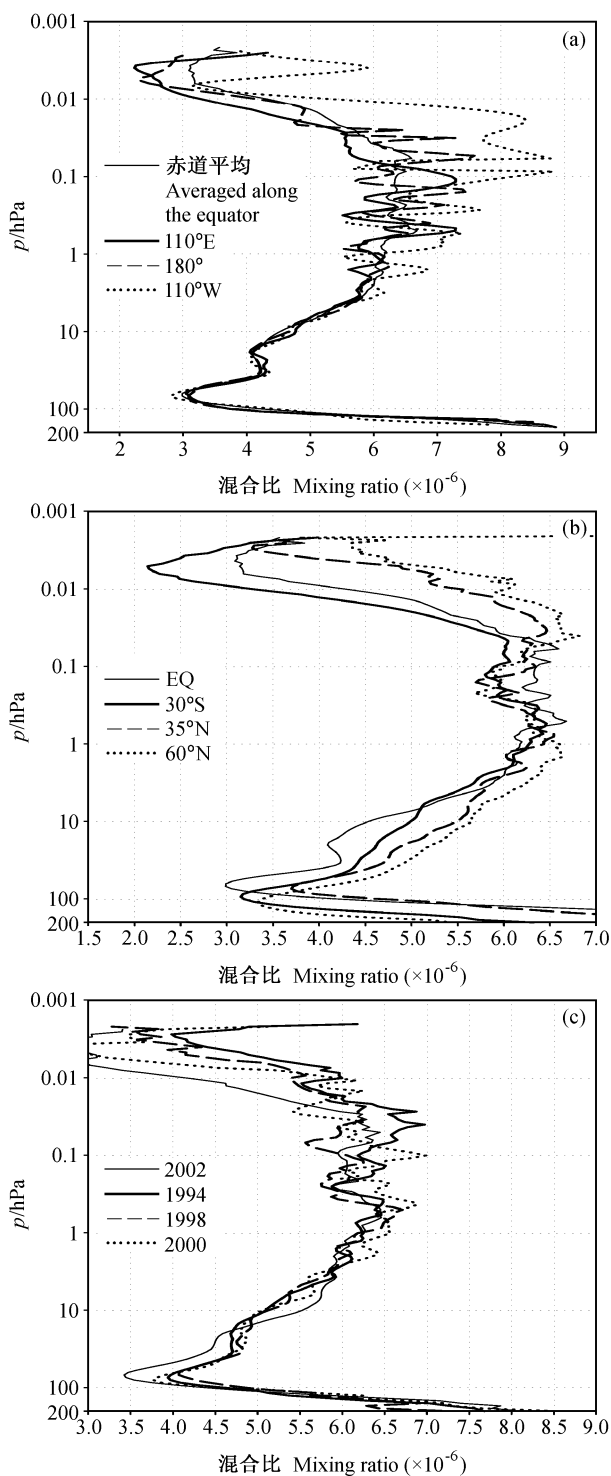


图 1 北半球夏季水汽混合比垂直廓线: (a) 1995 年赤道地区不同经度; (b) 1995 年不同纬度纬圈平均; (c) 不同年份沿 35°N 处

Fig. 1 The profiles of H₂O mixing ratio in JJA (Jun, Jul, Aug): (a) for various longitudes along the equator for 1995; (b) averaged along various latitudes for 1995; (c) averaged along 35°N in different years

层水汽的垂直分布,与 Kley 等^[20]的观测结果都是一致的,只是数值上有些差异。

3.2 甲烷的垂直分布特征

图 2 也给出了三种不同情况的甲烷的垂直廓线。图 2a 是 1995 年北半球夏季赤道地区不同经度

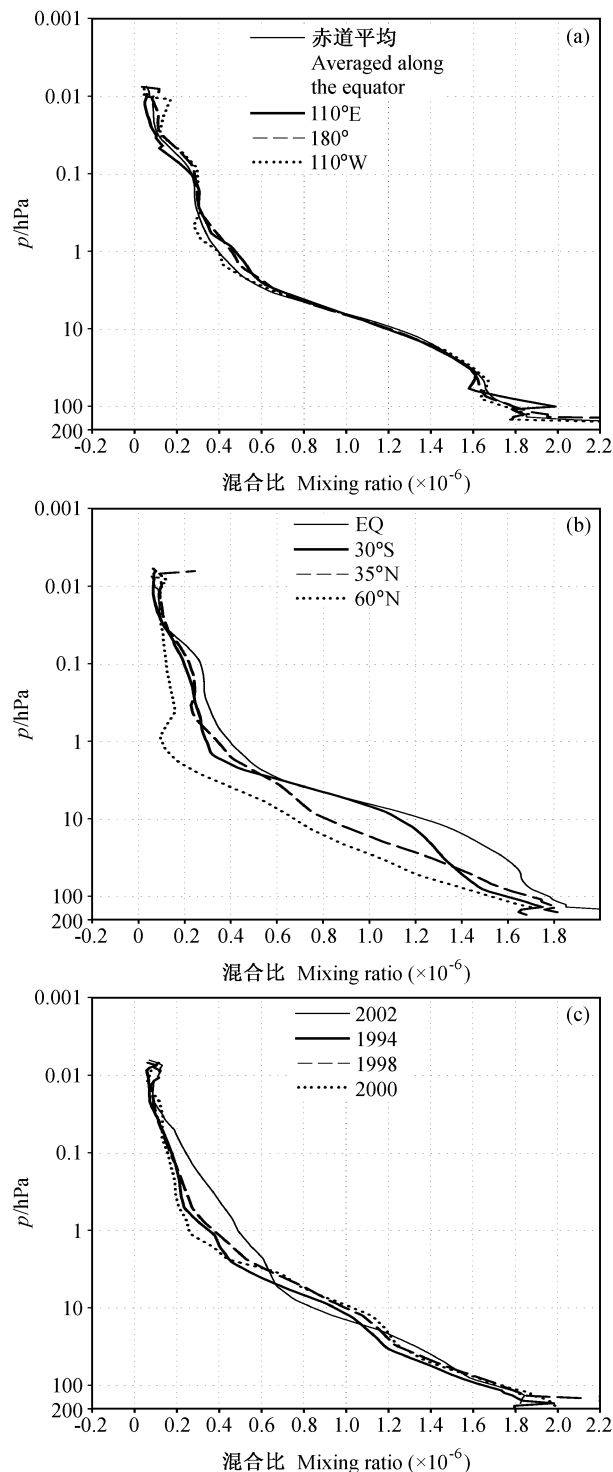


图 2 同图 1, 但为甲烷混合比

Fig. 2 As in Fig. 1, but for CH_4 mixing ratio

上和沿纬圈平均的甲烷混合比垂直廓线。可以看到,甲烷的垂直分布较水汽简单,从 100 hPa 向上至大约 0.01 hPa,甲烷混合比一直是减少的,尤其在平流层减少得很快。WMO 的全球臭氧研究和监测计划 (WMO Global Ozone Research and Monitoring Project)^[21]曾总结过 NCAR、NOAA 和 KFA 对甲烷垂直分布的观测结果,其中,NCAR、NOAA 和 KFA 的数据分别由 Pollock 等^[22], Bush 等^[23]和 Volz 等^[24]收集和整理。这里用 HALOE 资料得到的甲烷的垂直廓线与他们的结果一致。中间层甲烷混合比约为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ 。在平流层中下层赤道地区不同经度甲烷混合比的差别很小,只是在 100 hPa 附近 110°E 处其混合比稍高于其他地区,在平流层上层和中间层不同经度地区混合比略有差异。图 2b 是 1995 年北半球夏季不同纬度沿纬圈平均的甲烷混合比垂直廓线,表明不同纬度甲烷混合比随高度的变化总体一致,但不同纬度混合比数值是有差异的,赤道地区最高,其次是中纬度,高纬度最小,中间层上层,纬度差异很小。图 2c 是 1994、1998、2000、2002 年沿 35°N 纬圈平均的甲烷混合比垂直廓线,表明不同年份其廓线特征相似,但混合比数值有差异,在平流层中层 2002 年混合比低于其他 3 年,在平流层高层和中间层中低层却高于这 3 年。中层大气中 CH_4 主要来自对流层的传输,因此从地面向上混合比是减少的,平流层中层以上,甲烷很容易被氧化生成水汽,因此甲烷的混合比很低。

从以上的分析可以看出,在最近的 10 多年里,平流层水汽和甲烷的分布特征变化不大,但是各年它们的混合比大小有些不同。它们的变化趋势将另文讨论。

4 水汽和甲烷的经向-高度分布

4.1 水汽的纬度-高度分布特征

为了进一步分析中层大气水汽随纬度的变化,下面给出北半球夏季和北半球冬季水汽混合比纬度-高度剖面图 (图 3)。图 3 告诉我们,水汽混合比在不同纬度随着高度的变化趋势基本一致,但在同一高度上其经向差异明显。在北半球夏季:200~100 hPa 附近混合比等值线在热带低纬度地区向上拱起 (单峰),对流层上层混合比自低纬向高纬递减很快。在对流层顶和平流层底混合比达到极小

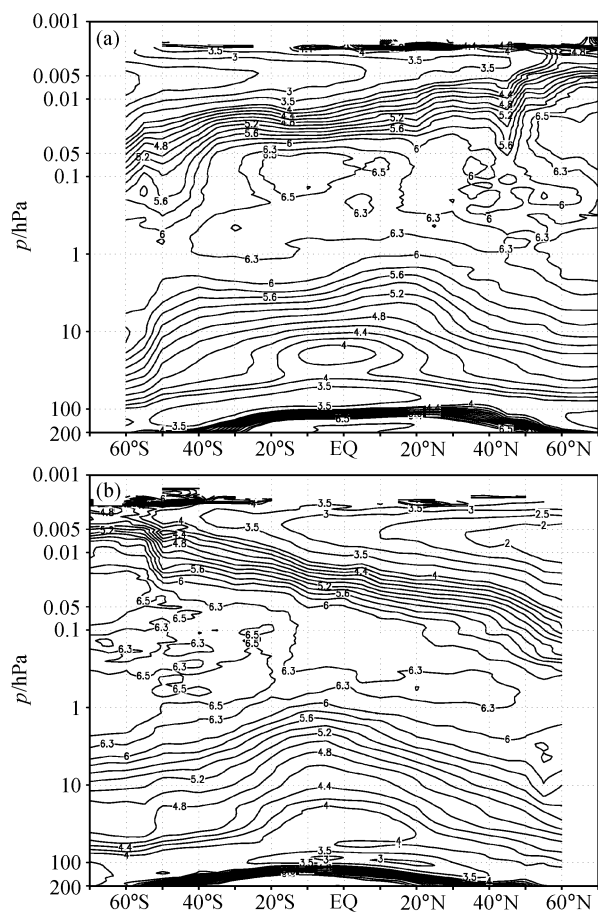


图3 北半球水汽混合比($\times 10^{-6}$)纬度-高度剖面图:(a)夏季;(b)冬季

Fig. 3 The latitude-altitude cross sections of H₂O mixing ratio ($\times 10^{-6}$) for (a) JJA and (b) DJF (Dec, Jan, Feb)

值,由于各个纬度对流层顶和平流层底所在高度不同,所以极小值所在高度也不同(也就是说,湿层顶的高度随纬度而变化),在中高纬度地区这个极小值所在高度明显低于热带地区。而且在北半球夏季这个极小值的中心偏向南半球,因此在100 hPa附近北半球中纬度地区混合比稍大于赤道地区。平流层中下层等值线在赤道低纬度地区也呈单峰上拱的形势,但水汽混合比自低纬向高纬递增。在平流层中上层等值线变成双峰形势,主峰位于 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$,次峰在 $40^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{S}$,说明这些地区水汽混合比小于同高度周围地区。在低平流层副热带 $20^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$ ($20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$)附近水汽混合比水平梯度相对较大,即这个地区存在所谓的混合障碍(mixing barriers)^[8]。到 $0.5\sim 0.05$ hPa附近(平流层顶到中间层下层),热带低纬度地区又出现闭合高值中心,

在 $0.05\sim 0.005$ hPa附近(中间层中上层),北半球高纬度($50^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$)混合比更大一些。从这个极大值向上混合比开始减小,在中间层顶达到极小,然后又开始增加。与对流层不同的是,中间层顶附近的极小值区中心不在热带地区,而是在南极附近,其轴线从南半球到北半球向上倾斜。由此可见,中层大气中从低空到高空,水汽的经向梯度符号经历了明显变化。

与北半球夏季不同的是,北半球冬季对流层上层的水汽混合比高值中心偏向南半球,位于对流层顶和平流层底的低值中心偏向北半球,平流层的双峰现象没有出现,平流层中上层单峰位于 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{S}$ 。平流层顶至中间层下层在热带低纬度没有出现高值中心,而是在南半球高纬地区混合比较大,特别是在中间层上层副极地地区更大。中间层顶附近极小值出现在北极附近,其轴线从南半球到北半球向下倾斜。

从以上分析可知,中层大气水汽随高度的变化不是单一的,极大和极小值的出现非常值得我们关注。在平流层顶和中间层顶附近,高纬度地区混合比北半球冬季和夏季的差别非常明显,可能与温度场、化学过程有关,其原因值得进一步分析。热带低纬度地区混合比北半球冬季和夏季的差异在平流层低层和对流层高层显著,可能与温度场和垂直运动有关系,其原因也值得进一步分析。

4.2 甲烷的纬度-高度分布特征

图4给出了北半球夏季和冬季甲烷混合比纬度-高度剖面图。分析表明在不同纬度带甲烷混合比随着高度的变化趋势基本一致,但在同一高度上其经向差异明显。在北半球夏季:200~100 hPa热带低纬度地区($10^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$)混合比较高(高值中心偏在北半球)。平流层中下层,甲烷混合比等值线呈单峰形势,基本关于赤道对称,混合比自赤道向极地递减。平流层中上层等值线变成双峰,主峰位于北半球(夏半球) $10^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$,次峰在 $40^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{S}$ 附近,说明这些地区甲烷混合比比同高度周围地区大。在低平流层 $20^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$ ($20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$)附近,甲烷混合比水平梯度相对偏大,即这个地区存在混合障碍^[8]。1~0.1 hPa北半球高纬度地区甲烷混合比偏小,0.1~0.05 hPa等值线趋于平直,0.05~0.01 hPa(中间层中上层)出现极小值,极小值区在南极附近,其轴线从南半球到北半球略向

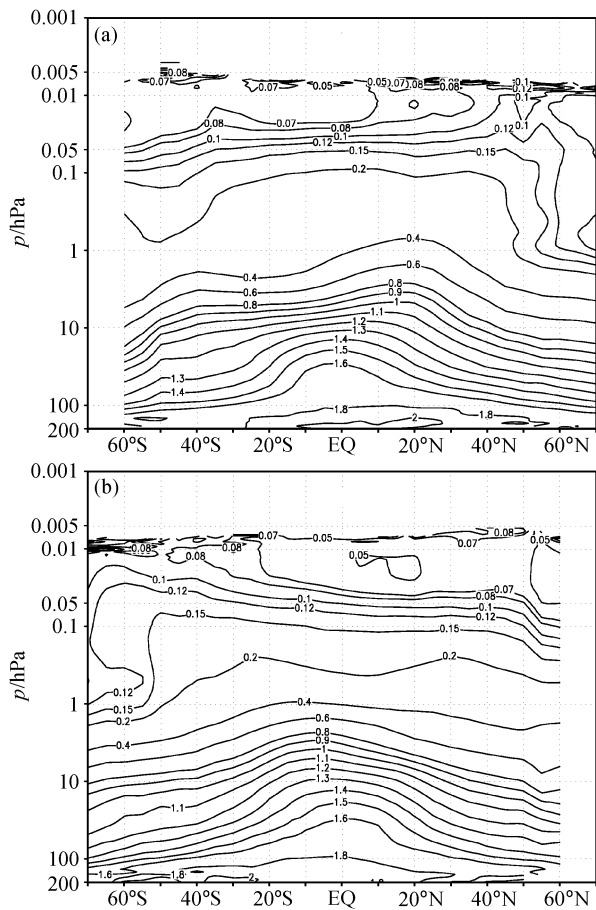


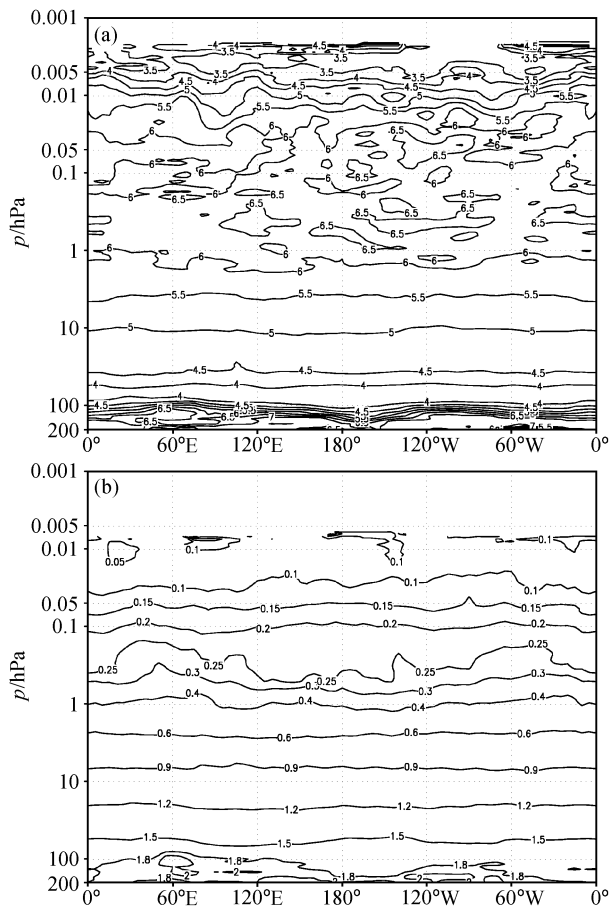
图4 同图3, 但为甲烷混合比

Fig. 4 As in Fig. 3, but for CH_4 mixing ratio

上倾斜。与夏季不同的是, 北半球冬季对流层上层其混合比高值区偏在南半球。等值线在平流层一直是单峰形势, 在中上层波峰向南半球偏移 ($0^\circ \sim 20^\circ\text{S}$)。1~0.1 hPa 南半球高纬度地区甲烷混合比偏小, 中间层中上层的极小值区在北极附近, 其轴线从南半球到北半球略向下倾斜。对比图3和图4发现, 两图中等值线的变化有很多相似之处。甲烷在平流层中下层很稳定, 是很好的示踪气体, 我们在以上分析的基础上还可以继续分析平流层的环流对甲烷分布的影响, 同样, 水汽也可以作为示踪气体来追踪大气的运动。

5 水汽和甲烷纬向-高度分布

上面分析了不同纬度水汽和甲烷分布的差异, 那么它们沿纬向的差异是否明显? 图5给出北半球夏季沿 30°N 水汽和甲烷的经度-高度分布。图5a表明: 200 hPa 附近等值线多呈闭合形势, 但 200~

图5 北半球夏季 30°N 水汽 (a) 和甲烷 (b) 混合比 ($\times 10^{-6}$) 经度-高度剖面图Fig. 5 The longitude-altitude cross sections for H_2O (a) and CH_4 (b) mixing ratios ($\times 10^{-6}$) in JJA

100 hPa 等值线呈波状, 南亚伊朗及青藏高原地区和北美落基山地区处于波峰位置, 表明这些地区对流顶偏高, 原因主要是这些地区夏季对流活动旺盛, 因此水汽混合比也偏大。东太平洋处于波谷, 水汽混合比偏低, 说明这个地区对流活动弱。平流层中下层水汽混合比的纬向分布比较均匀, 平流层上层到中间层中下层以闭合形势为主, 纬向梯度出现。中间层上层等值线又转变为波状, 沿纬圈起伏变化较多, 有些地区纬向梯度明显, 有些地区则不明显。文献[2]中图 5.21 表明, 在平流层中下层纬向风输运的时间常数远远小于经向风、垂直运动、涡旋输送的时间常数以及水汽分子的光化学寿命, 因此水汽沿纬圈能充分混合。但随着高度的增加, 水汽的光化学寿命缩短和纬向风输运的时间常数增加, 使得水汽分布受动力学效应和光化学反应的共

同影响, 纬向分布变得复杂化。

图 5b 反映出对流层顶附近伊朗及青藏高原地区甲烷混合比明显偏高, 其次是北美落基山地区, 可能与这些地区北半球夏季对流活动旺盛有关。东太平洋依然是甲烷混合比的波谷。在平流层中层和下层等值线的分布与图 5a 相似。平流层上层和中间层下层纬向梯度明显加强, 但在中间层中层纬向梯度又变得不明显, 中间层中上层纬向梯度又有加强。文献[2]中图 5.12 表明, 甲烷的光化学寿命在 50 km 以下随高度减小, 从 50~70 km 增加很快, 从 70 km 向上又迅速减少, 因此, 在中间层中层甲烷混合比纬向梯度又变得不明显。

6 总结

本文利用 1991 年 12 月至 2004 年 5 月的 HALOE 资料, 分析了中层大气中微量气体水汽和甲烷的垂直和水平分布特征。得到的主要结论如下:

(1) 水汽混合比在对流层顶和平流层底达到极小值(此极小值区被称为湿层顶), 在平流层里水汽混合比随高度逐渐增加, 但到了平流层上层和中间层低层其混合比出现明显的扰动。从中间层中层向上再次随高度减少, 到中间层顶达到极小值, 向上混合比又随高度增加。

(2) 同一高度水汽混合比的经向差异明显。对流层上层水汽混合比自低纬向高纬减小很快。对流层顶的极小值区在北半球夏季偏向南半球, 北半球冬季偏向北半球。平流层中下层等值线呈单峰上拱的形势, 基本关于赤道对称, 水汽混合比自低纬向高纬递增。平流层中上层等值线在北半球夏季变成双峰形势, 北半球冬季仍是单峰, 但波峰位置南移。在低平流层副热带 20°S~30°S (20°N~30°N) 附近水汽混合比水平梯度相对较大。中间层中上层, 北半球夏季在北半球高纬度出现高值中心, 北半球冬季高值中心在南半球高纬度。中间层顶附近, 北半球夏季南极附近水汽混合比最小, 北半球冬季北极附近水汽混合比最小。

(3) 从大约 100 hPa 向上至中间层低层, 甲烷混合比一直减少, 再向上直到中间层上层混合比变化不大, 约为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ 。

(4) 同一高度甲烷混合比经向差异明显。对流层上层甲烷混合比自低纬向高纬减小。平流层中下层甲烷混合比等值线呈上拱的单峰形势, 基本关于

赤道对称, 混合比自低纬向高纬递减。北半球夏季平流层中上层甲烷混合比等值线变成双峰, 北半球冬季仍是单峰, 但波峰位置南移。在低平流层副热带 20°S~30°S (20°N~30°N) 附近水平梯度相对偏大。平流层上层和中间层下层北半球夏季北半球高纬度地区甲烷混合比偏小, 北半球冬季则是南半球高纬度地区偏小, 中间层中上层北半球夏季在南极附近是极小值, 北半球冬季极小值在北极附近。

(5) 在北半球夏季 30°N, 对流层顶附近, 南亚伊朗及青藏高原和北美落基山地区水汽混合比较同纬度其他地区偏大, 东太平洋地区水汽混合比最低, 平流层中下层水汽混合比纬向梯度很小, 甲烷也类似; 中间层水汽混合比纬向梯度明显; 甲烷混合比在平流层顶附近和中间层下层纬向梯度明显加强, 但在中间层中层纬向梯度又变得不明显, 在中间层中上层又有加强。

(6) 平流层中下层水汽混合比和甲烷混合比的分布形势基本相反, 同一高度上水汽低的纬度, 甲烷混合比高, 水汽高的纬度, 甲烷低。这表明平流层中下层大气运动对水汽和甲烷的分布有显著影响, 而且两种微量气体之间的联系也很密切。

(7) 在最近的十多年里, 平流层水汽和甲烷的分布特征变化不大, 但是不同年份它们的混合比大小有些不同。

通过以上分析, 我们认为接下来的这些工作是非常重要的和有意义的, 即分析平流层水汽和甲烷含量的变化趋势, 平流层的大气运动与水汽、甲烷分布和变化之间的联系, 水汽、甲烷的分布和变化与温度场的关系, 水汽和甲烷在中层大气的辐射效应等。

致谢 感谢 UARS 卫星计划的研究人员提供了 HALOE 资料。

参考文献 (References)

- [1] Ramaswamy V, Chanin M L, Angell J, et al. Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations. *Reviews of Geophysics*, 2001, **39**: 71~122,
- [2] G. 布拉塞, S. 索洛蒙. 中层大气化学和物理学. 黄润恒译. 北京: 气象出版社, 1988
Brasseur G, Solomon S. *Aeronomy of the Middle Atmosphere* (in Chinese). Translated by Huang Runheng. Beijing: China Meteorological Press, 1998
- [3] Kirk-Davidoff D B, Hintsa E J, Anderson J G, et al. The effect of climate change on ozone depletion through changes

- in stratospheric water vapour. *Nature*, 1999, **402**, 399~401
- [4] Kley D, Russell III J M, Phillips C. SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapour. Water Vapour Working Group under the auspices of the SPARC Scientific Steering Group, 2000. 95~193, 197~234
- [5] Randel W J, Wu Fei, Oltmans S J, et al. Interannual changes of stratospheric water vapour and correlations with tropical tropopause temperatures. *J. Atmos. Sci.*, 2004, **61** (17): 2133~2148
- [6] 陈洪滨, 卞建春, 吕达仁. 上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望. 大气科学, 2006, **30** (5): 813~820
Chen Hongbin, Bian Jianchun, Lü Daren. Advances and prospects in the study of stratosphere-troposphere exchange. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (5): 813~820
- [7] 程红兵, 王木林, 温玉璞, 等. 我国瓦里关山、兴隆温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的背景浓度. 应用气象学报, 2003, **14** (4): 402~409
Cheng Hongbing, Wang Mulin, Wen Yupu, et al. Background concentration of atmospheric CO₂, CH₄ and N₂O at Mt. Waliguan and Xinglong in China. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **14** (4): 402~409
- [8] Randel W J, Wu Fei, Russell III J M, et al. Seasonal cycles and QBO variations in stratospheric CH₄ and H₂O observed in UARS HALOE data. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**: 163~185
- [9] Dunkerton T J. Quasi-biennial and subbiennial variations of stratospheric trace constituents derived from HALOE observations. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58**: 1~25
- [10] Oltmans S J, Hoffmann D J. Increase in lower-stratospheric water vapour at mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981 to 1994. *Nature*, 1995, **374**: 146~149
- [11] Foster P M D, Shine K P. Stratospheric water vapor changes as a possible contributor to the observed stratospheric cooling. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 3309~3312
- [12] Dlugokencky E J, Masarie K A, Lang P M, et al. Continuing decline in the growth rate of the atmospheric methane burden. *Nature*, 1998, **393**: 447~450
- [13] Russell III J M, Gordley L L, Park J H, et al. The halogen occultation experiment. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98** (D6): 10777~10797
- [14] 简俊, 陈月娟, 郑彬, 等. 北半球中层大气中 NO_x 的垂直分布特征. 大气科学, 2001, **25** (5): 697~706
Jian Jun, Chen Yuejuan, Zheng Bin, et al. NO_x vertical distribution in the middle atmosphere in the Northern Hemisphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (5): 697~706
- [15] Chen Yuejuan, Zheng Bin, Zhang Hong. The features of ozone quasi-biennial oscillation in tropical stratosphere and its numerical simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19**: 777~793
- [16] 郑彬, 陈月娟, 简俊. 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
Zheng Bin, Chen Yuejuan, Jian Jun. Quasi-biennial oscillation in NO_x and its relation to quasi-biennial oscillation in O₃, Part I: Data analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27** (3): 280~292
- [17] 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): 701~708
- [18] 陈月娟, 施春华. 从 HALOE 资料看青藏高原上空 HCl 分布及其与 O₃ 的关系. 高原气象, 2005, **24** (1): 1~8
Chen Yuejuan, Shi Chunhua. Study on HCl distribution and its relation to ozone over Qinghai-Xizang Plateau using HALOE data. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (1): 1~8
- [19] 郑彬. 中层大气微量气体的分布特征和动力输送的研究. 中国科学技术大学博士学位论文, 2003
Zheng Bin. Study on the distribution and dynamical transport of the trace gases in middle atmosphere. Ph. D. dissertation (in Chinese). University of Science and Technology of China, 2003
- [20] Kley D, Stone E J, Henderson W R, et al. In situ measurements of the mixing ratio of water vapor in the stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**: 2513~2524
- [21] World Meteorological Organization (WMO). The stratosphere 1981 theory and measurements. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 11. Geneva, 1982. 1~37
- [22] Pollock W, Heidt L E, Lueb R, et al. Measurement of stratospheric water vapor by cryogenic collection. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**: 5555~5568
- [23] Bush Y A, Schmeltekopf A L, Fehsenfeld F C, et al. Stratospheric measurements of methane at several latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 1978, **5**: 1027~1029
- [24] Volz A, Schmidt U, Rudolph J, et al. Vertical profiles of trace gases at mid-latitudes. Jul-Report No. 1742, Kernforschungsanlage, Julich, Federal Republic of Germany, 1981