

利用 SAGE II 遥感分析我国上空 平流层臭氧的分布和变化特征*

陈洪滨

许丽生

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080) (成都气象学院, 成都 610041)

王普才

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100080)

提 要

根据 1984~1992 年的 SAGE II 观测资料, 对平流层臭氧(O_3)进行了反演, 分析了我国三个纬度区域($20^\circ\sim 50^\circ N$)的平流层 O_3 分布和变化特征, 得到了可作为参考模式的多年平均的平流层 O_3 总量季节变化曲线和 4 个月份的垂直分布廓线。

关键词: SAGE II; 臭氧变化; 平流层臭氧廓线。

1 问题的提出

近年来发现, 由于人类的活动和自然的扰动, 使得大气层(主要是平流层)中 O_3 的含量发生了明显的减少趋势, 特别是南极的“臭氧洞”在不断地加深^[1~3]。这导致了到达地球生物圈的太阳紫外辐射量不断增加, 并可能造成对人类和动植物的伤害^[4,5]; 而且, 通过辐射、动力和化学等过程影响全球的气候变化^[6,7]。这使人类面临着一次巨大的挑战, 促使我们必须加强对 O_3 的监测, 并对其变化的原因及其影响进行更加全面和深入的研究。

测量平流层 O_3 的技术手段多种多样, 但在时空上能够连续和大范围监测 O_3 的唯一手段是卫星遥感。本文将利用 SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II) 的观测资料, 反演和分析我国上空平流层 O_3 的分布及其变化情况。

2 SAGE II 仪器和资料反演

SAGE 系列是探测平流层气溶胶和微量气体的太阳光度计, 采用太阳遮光技术, 在卫星日升或日落时, 测量经大气衰减后一定波长处太阳辐射的垂直廓线, 其垂直分辨率为 1km。图 1 是太阳遮光法日落测量的示意图。仪器在切线高度 $h_t = 350\text{km}$ 时开始工作, 扫

* 国家自然科学基金 49275239 项目资助。

1993-06-21 收到, 1994-02-19 收到修改稿。

描太阳圆盘,此时测得的是未经大气衰减的太阳辐射 I_{∞} ;随着卫星的下降,得到经大气衰减后的测量值 $I_{\lambda}(h_i)$;大气透过率则为 $\tau_{\lambda}(h_i) = I_{\lambda}(h_i) / I_{\infty}$. 故此技术是自校正的^[8].

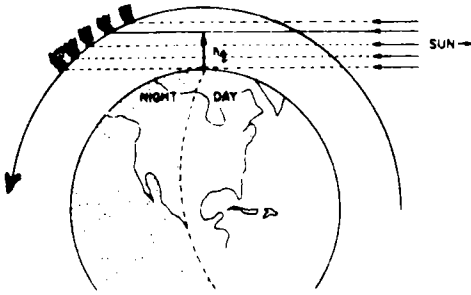


图 1 太阳遮光法日落测量示意图

第一代 SAGE 仪器装在 AEMS-2

(Applications Explorer Mission Satellite)上,并于 1979 年 2 月发射上天开始工作的. 它共有 4 个通道,它们的中心波长分别为 $1.0\mu\text{m}$ 和 $0.45\mu\text{m}$ (测气溶胶消光系数)、 $0.6\mu\text{m}$ (位于 O_3 的 Chappius 吸收带的峰值处,从而提供 O_3 的测量)、 $0.385\mu\text{m}$ (提供 NO_2 的测量).

第二代 SAGE 仪器(即 SAGE I)是由 ERBS (Earth Radiation Budget

Satellite)于 1984 年 10 月携带上天的,它共有 7 个通道,中心波长为 $0.385\mu\text{m}$ 、 $0.45\mu\text{m}$ 、 $0.525\mu\text{m}$ 和 $1.02\mu\text{m}$ 的 4 个通道用来测量气溶胶消光, $0.6\mu\text{m}$ 和 $0.448\mu\text{m}$ 通道分别测量 O_3 和 NO_2 ,而 $0.94\mu\text{m}$ 通道则用于测量水汽^[9]. 从 1984 年到现在的观测实践表明,SAGE I 是一种十分成功的遥感探测平流层大气的星载仪器. 下面我们简要地介绍一下 SAGE I 的反演原理和方法.

SAGE I 在时间 t 测得的辐照度为^[10]

$$H_{\lambda} = \int_{\Delta\lambda} \int_{\Delta\Omega} F_{\lambda}(\theta, \varphi) S_{\lambda}(\theta, \varphi, t) T_{\lambda}(\theta) d\Omega d\lambda \quad (1)$$

式中, $F_{\lambda}(\theta, \varphi)$ 是光度计的视场函数, $T_{\lambda}(\theta)$ 是以观测角 θ 为变量的大气透射函数, $S_{\lambda}(\theta, \varphi, t)$ 是大气层外波长为 λ 的太阳辐射亮度. 由于 θ 是切线高度 h_i 的唯一函数,根据 Bouguer 定律,透射函数可用射线切线高度 h_i 表示为

$$T_{\lambda}(h_i) = \exp[-\delta_{\lambda}(h_i)] = \exp\left[-\int \beta_{\lambda}(h) dP_{\lambda}(h)\right] \quad (2)$$

式中, $\delta_{\lambda}(h_i)$ 是斜线路径总的光学厚度, $\beta_{\lambda}(h)$ 是大气总消光系数, $P_{\lambda}(h)$ 是太阳光线的光学路径长度.

大气总消光系数为

$$\beta_{\lambda} = \beta_R(\lambda) + \beta_{\text{O}_3}(\lambda) + \beta_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) + \beta_{\bullet}(\lambda) \quad (3)$$

式中, β_R 是中性大气分子的 Rayleigh 散射消光系数, β_{O_3} 、 $\beta_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 β_{NO_2} 和 β_{\bullet} 分别为 O_3 、水汽、 NO_2 和气溶胶的消光系数. O_3 和 NO_2 的消光系数分别由它们的数密度与给定波长的吸收截面的乘积决定;气溶胶的消光系数是谱分布、质点形状和折射指数的函数.

对 SAGE I 资料的处理主要是把 7 个通道的太阳辐射测值转化为相应波长的大气斜线路径透过率,然后确定每种成分的垂直消光廓线和浓度廓线. 目前,国际上有两种 SAGE I 反演算法^[10]:一种是 NASA/LaRC 的业务多通道反演法;另一种是法国 Lille 科技大学大气光学实验室(LOA)的反演法. SAGE I O_3 测量的可信度已通过与其它测量方法的比较得到验证. 比较 SAGE I 与 O_3 探空仪的测量结果表明,两者的平均差在 20~53km 高度之间约为 1%^[11]. SAGE I 测量 O_3 廓线的精度在 24~48km 高度范围内不低于

7%；在中纬度，50~60km 以及 20~12km，SAGE I 都给出有意义的反演廓线^[11,12]。

我们主要使用 NASA/LaRC 提供的 SAGE I O₃ 资料(从 1984 年 10 月至 1992 年 3 月)。我们的研究区域定在 90°~130°E, 20°~50°N。由于 O₃ 的经向变化大，而在纬向变化小，故在纬度方向再细分 3 个子区域：20°~30°N(南区)、30°~40°N(中区)和 40°~50°N(北区)。

由于云层有时突破对流层顶会影响平流层下层 O₃ 量的反演，因此数据误差大，不宜采用。在下面的资料分析中，对不同的子区域和不同的季节，均取 15.5km 作为 O₃ 总量垂直积分的下限。尽管 O₃ 廓线的峰值高度是变化的，但 15.5km 以上的 O₃ 总量的分布和变化的情况，基本上反映了平流层 O₃ 总量的分布和变化特征。

3 资料分析和结果

3.1 多年月平均平流层 O₃ 量

图 2 给出了南、中、北 3 个子区域多年月平均平流层 O₃ 量的季节变化。由图可见，3 个子区域的 O₃ 量均有显著的季节变化，但它们的极大值和极小值所出现的月份不同。南区平流层 O₃ 量达到全年极大值的时间在 6~7 月份。而北区则在 3 月份，即 O₃ 量达到极大值的时间随纬度增高而提前；3 个子区域的平流层 O₃ 量达到最小值的时间相差得更大。北区在 7~8 月份，中区在 10 月份，而南区在次年 1 月份。

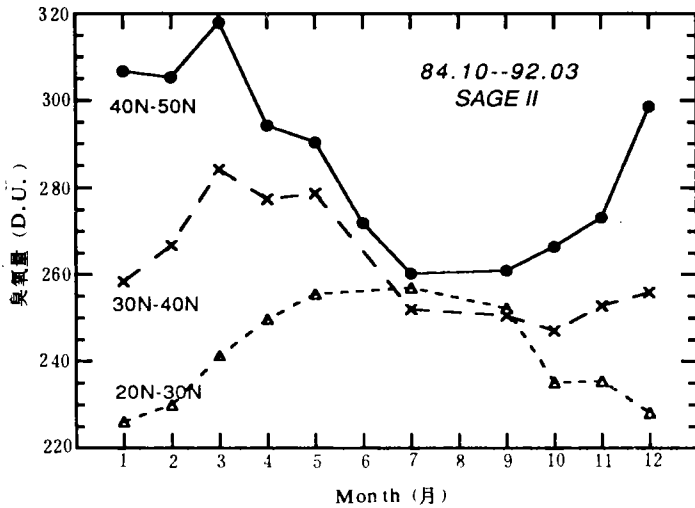


图 2 15km 以上多年月平均臭氧量的季节变化

从图 2 中还可看出，在冬季 3 个区域的 O₃ 量相差很大，北区比南区约高 70 个 Dobson 单位；而在夏季(6~9 月)，3 个区域 15.5km 以上的平流层 O₃ 量相差不大。此外，比较图 2 中三条曲线还表明，北区 O₃ 量季节变化的振幅比南区的大；北区的极大极小值之差约为 60Dobson 单位，中区和南区的分别为 40 和 30Dobson 单位左右。

由以上分析得到：我国北区和南区的 O₃ 量季节变化几乎反相；季节变化的振幅随纬度增高而增大。我们知道，平流层中 O₃ 含量主要由对流层顶高度(即平流层中下层的温度)、太阳辐射强度和大气环流型式所决定。北区(40°~50°N)冬夏季对流层顶高度和太阳

辐射强度变化大,故北区 O_3 量季节变化大;在冬末春初,对流层中的对流活动仍不活跃,对流层顶高度变化不大,且太阳辐射在增强,此时 O_3 量有极大值;夏末秋初,尽管太阳辐射很强,但对流层顶的升高使平流层中的温度降低,北区 O_3 量在此时最少. 在南区($20^\circ \sim 30^\circ N$)上空,对流层顶高度和太阳辐射强度变化不大,故 O_3 量变化振幅小;夏季的太阳辐射强度强、光化作用强,还可能由于平流输送作用,因此南区的 O_3 量在此时达到一年中的最大值. 此外,由于 SAGE I 资料尚不够多(SAGE I 探测时间不到 10 年),图中曲线不够光滑. 尽管如此,这些曲线仍可作为我国上空平流层 O_3 量多年平均的季节变化的参考曲线.

3.2 平流层 O_3 的垂直分布

图 3 给出我国 3 个纬度区域多年平均的平流层 O_3 垂直分布廓线. 其中,1、4、7 月份的廓线为 7 年平均(1985~1991);10 月份的廓线仅为 5 年平均,这是因为 1987 年 10 月份无 SAGE I 资料,而 1991 年 10 月份的资料受到了 Pinatubo 火山气溶胶的污染,没有被采用. 从图 3 可以看出:

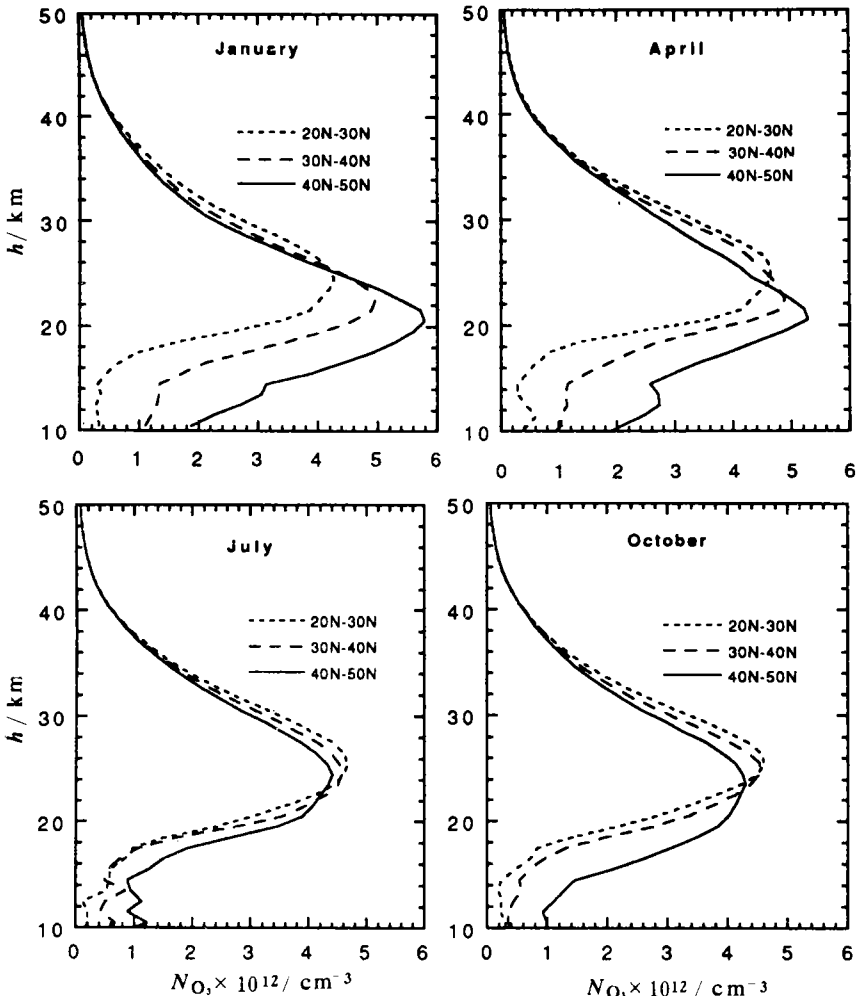


图 3 3 个纬度区域多年平均的平流层 O_3 垂直分布廓线

(1)一般说来, O_3 浓度从对流层顶开始向上逐渐增大,至平流层某一高度达到极大值,然后随高度增加而减小;(2)平流层各季 O_3 垂直分布的极大值所处高度总是南区最高,北区低;(3)对同一纬度区, O_3 极大值的高度是冬季低,夏季高;而且,北区平流层 O_3 极大值的高度,其季节变化最大,约3~4km,而南区的仅为1~2km;(4) O_3 浓度极大值呈现季节变化,而且这种变化随纬度增高而愈加显著.南区极大值的季节变化约为10%,北区的则为25%;在1月份3个纬度区域的 O_3 浓度极大值之差最大,而在7月份最小;(5)在15.5km以下,几乎所有的廓线均显得有些不规则,这是由于受对流层中云的影响,使得SAGE I反演 O_3 的误差变大之故.

参 考 文 献

- 1 Herman J R, Hudson R R, McPeters R, et al. A new self-calibration method applied to TOMS and SBUV backscattered ultraviolet data to determine long-term global ozone change. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:7531~7545.
- 2 Stolarski R S, Schoeberl M R, Newman P A, et al. The 1989 Antarctic ozone hole as observed by TOMS. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**:1267~1270.
- 3 Stolarski R S, Bloomfield P, McPeters R D and Herman J R. Total ozone trends deduced from Nimbus7 TOMS data. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**:1015~1018.
- 4 Madronich S. Implication of recent total atmospheric ozone measurements for biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**:37.
- 5 UNEP. Environmental Effects Panel Report, edited by Van J C der Leun, Tevini M and Worrest R C, Nairobi, Kenya, 1989.
- 6 Tsay S C and Stamnes K. Ultraviolet radiation in the Arctic: The impact of potential ozone depletion and clouds. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**:7829~7840.
- 7 World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project-Atmospheric Ozone. Report No. 16, Geneva, 1985.
- 8 Chu W P and McCormick M P. Inversion of stratospheric aerosols and gaseous constituents from spacecraft solar extinction data in the 0.38~1.0 μ m wavelength region. *Appl. Opt.*, 1979, **18**:1404~1413.
- 9 Mauldin L E, Zaun N H, McCormick M P, et al. Stratospheric Aerosol and Gas Experiment I Instrument: A function description. *Opt. Eng.*, 1985, **24**:307~312.
- 10 Chu W P, McCormick M P, Lenoble J, Brogniez C and Pruvost P. SAGE I inversion algorithm. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:8339~8351.
- 11 Cunnold D M, Chu W P, Barnes R A, McCormick M P and Veiga R E. Validation of SAGE I ozone measurements. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(D6):8447~8460.
- 12 Attmannspacher W, J de la Noe, D de Muer, et al. European validation of SAGE I ozone profiles. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(D6):8461~8466.

A STUDY OF THE DISTRIBUTION AND EVOLUTION CHARACTERISTICS OF STRATOSPHERIC OZONE OVER CHINA USING SAGE I DATA

Chen Hongbin Wang Pucui

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Xu Lisheng

(Chengdu Meteorological College, Chengdu 610041)

Abstract

On the basis of SAGE I observation data from October 1984 to March 1992, the retrieval of the stratospheric ozone (O_3) is performed. The distribution and evolution characteristics of the stratospheric O_3 varying with seasons and the vertical profiles for four months (January, April, July and October) are given.

Key words: SAGE I ; Ozone evolution; Stratospheric profile of ozone density.