

# 利用探空资料验证GOME卫星臭氧数据

蔡兆男<sup>1,2</sup>, 王永<sup>1</sup>, Liu Xiong<sup>3,4</sup>, 郑向东<sup>5</sup>, Kelly Chance<sup>3</sup>, 刘毅<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA

4 Goddard Earth Sciences and Technology Center, UMBC, Baltimore, MD, USA

5 中国气象科学研究院, 北京, 100081

## 摘要

利用拉萨, 西宁, 北京三个站点的臭氧探空资料验证了GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) 卫星臭氧廓线及对流层臭氧柱总量。探空仪器为双池型电化学臭氧探空仪ECC (Electronic Chemistry Cell) (拉萨, 西宁) 和国产GPS臭氧探空仪 (北京), GOME资料选用Liu Xiong等反演的臭氧廓线资料。对比结果表明: 在对流层中下层, 拉萨和西宁两地GOME与探空的平均偏差小于5%, 北京地区平均偏差小于10%; 在上对流层/下平流层, 拉萨和西宁平均偏差小于10%, 北京小于20%; 在平流层中上层3个站点的平均偏差均小于5%。在上对流层/下平流层区域, GOME与臭氧探空的平均偏差在北京明显高于拉萨和西宁。三个地区对流层柱总量的平均偏差都在10%以内, 表明该资料可用于研究中国地区对流层臭氧总量的变化规律。GOME最低层 (0~2.5km) 月平均臭氧浓度对比结果显示, GOME结果同地面臭氧观测值有很好的相关性, GOME臭氧浓度反映了拉萨, 瓦里关, 临安地面臭氧浓度的主要变化特征。

**关键词:** 验证; 臭氧廓线; 对流层臭氧柱总量; GOME

## Validation of GOME ozone profiles and tropospheric column ozone with ozone sonde over China

Zhaonan Cai<sup>1,2</sup>, Yong Wang<sup>1</sup>, Xiong Liu<sup>3,4</sup>, Xiangdong Zheng<sup>5</sup>, Kelly Chance<sup>3</sup>, Yi Liu<sup>1,\*</sup>

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 100049

3 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA

4 Goddard Earth Sciences and Technology Center, UMBC, Baltimore, MD, USA

5 Chinese institute of meteorological science, Beijing, 100081

**Abstract:** Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) on board second Earth Remote Sensing (ERS-2) launched in 1995. To evaluate the performance of GOME's ozone data in China, ozone sonde observations at three stations in Lhasa(1998-1999), Xining(1996), and Beijing(2002-2003) are used to validate ozone profiles and tropospheric column ozone retrieved from Global Ozone Monitoring Experiment (GOME). Ozone detecting systems are Electrochemical concentration cell (ECC) sonde at Lhasa and Xining and GPSO3 sonde at Beijing; GOME data are retrieved by Liu et al.. A comparison data set consists of 51 matching pairs were obtained by applying a baseline criteria ( $\pm 6h$ ,  $\pm 3^{\circ}$  longitude,  $\pm 1.5^{\circ}$  latitude). A statistical analysis of the differences between coincident O3 profiles obtained by GOME and ozone sondes was conducted using the methodology suggested by von Clarmann. When comparing with measurements that have much better vertical resolution than satellite retrievals, we apply retrieval averaging kernels to the high-resolution data so that we are comparing the same data . As the high-resolution sondes profiles do not cover the GOME retrieval altitude range, we augment the high-resolution profile (ozone sonde only up to ~30 km) with monthly mean climatological profiles from TOMS V8. Statistical bias determination and precision validation show that in the lower and middle troposphere, the mean biases are significant within 5% at Lhasa and Xining and within 10% at Beijing. In the upper troposphere and lower stratosphere, the mean biases are within 10% at Lhasa and Xining and within 20% at Beijing. In the middle and upper stratosphere, the mean biases are within 5% at all three locations. The larger bias in the troposphere and lower stratosphere at Beijing may result from a different type of ozone sonde and different time period (ozone profiles shows multiple peaks in Beijing area in the spring). The mean biases of the tropospheric column ozone are within 10% at all three sites, which are partly caused by different estimated tropopause heights between GOME and ozone sondes. The GOME monthly mean ozone concentration at 0-2.5 km correlates well with surface ozone measurements, basically capturing the temporal variations of surface ozone at Lhasa, Waliguan, and Linan. In conclusion, from lower troposphere to upper stratosphere, GOME data used here has strong ability to analysis ozone distribution and dynamic changes in China.

Key words: validation, ozone profile, tropospheric column ozone, GOME

## 1 引言

臭氧是大气中重要的痕量气体，能够大量吸收紫外线有效地保护了地球生物。作为主要温室气体之一，臭氧在全球的辐射平衡过程和大气加热率计算中都扮演了重要的角色。在对流层，臭氧具有活泼的光化学性质，能参与多种光化学反应。特别是在近地面层，臭氧是光化学烟雾的重要组成部分，过量的臭氧对人体健康和植物生长都是不利的。

全球的臭氧的垂直分布对于研究大气的物理化学性质，平流层臭氧输送机制和对流层臭氧污染有重要意义。另外，臭氧的含量与分布对于评估其前体污染物（如CO，NO<sub>x</sub>）和动力学的输送作用也具有重要意义。

全球臭氧监测仪(GOME)搭载在欧空局(ESA)1995年发射的第二颗地球遥感卫星(ERS-2)上，利用240-790nm波段，对地扫描探测大气后向散射辐射。高分辨率光谱探测(0.2-0.4nm)和高信噪比使得GOME的原始光谱数据可以用于反演臭氧的垂直廓线分布<sup>[1]</sup>。1998年以来，人们提出了多种利用GOME资料反演臭氧廓线的算法<sup>[2-6]</sup>，Liu Xiong等在高精度的辐射校正和改进的正演辐射模式输入基础上，利用最优估计方法<sup>[7]</sup>和已知的对流层顶资料针对GOME卫星提出了从地面到平流层臭氧垂直分布的反演算法<sup>[8]</sup>。该方法能够得到对流层到平流层臭氧全球三维分布。该臭氧数据同全球33个臭氧探空站对流层臭氧柱总量对比结果显示偏差在15%以内<sup>[9]</sup>。

为了进一步验证该版本GOME臭氧资料在中国地区应用的可行性和精度，本文利用三个站点的臭氧探空资料对GOME 2.1版臭氧廓线及对流层柱总量(TCO)进行了详细验证，同时对拉萨郊区(91.16°E, 29.65°N, 海拔3650m)、瓦里关山(100.9°E, 36.28°N, 海拔3810m)、临安(119.73°E, 30.30°N, 海拔132m)观测的地面臭氧浓度与近地面层GOME臭氧浓度进行了对比。探空站点为拉萨(91.3°E, 29.7°N, 海拔3510m)，西宁(101.75°E, 36.63°N, 海拔2296m)和北京(116.39°E, 39.79°N, 海拔40m)，采用的两种气球探空仪分别是进口电化学探空仪ECC(拉萨(EN-SCI公司)，西宁(芬兰VAISALA公司))和国产GPS臭氧探空仪(北京)。

## 2 数据描述和误差估计

### 2.1 GOME卫星数据

Global Ozone Monitoring Experiment (GOME)具有 $320 \times 40 \text{ km}^2$ 的空间分辨率。文中应用的臭氧廓线资料是由Liu Xiong等利用最优估计方法反演的产品，该产品能够给出从地面到平流层

上层（~50km）24层的臭氧浓度资料以及对流层柱总量资料，数据的有效空间分辨率为 $960 \times 80 \text{ km}^2$ ，时间范围为1996年3月-2003年6月。

GOME反演臭氧结果的误差主要来源于仪器观测误差、不同的垂直分辨率造成的数据平滑误差、辐射模式输入参数的误差以及模式的误差，其中数据平滑误差（smoothing error）是反演结果误差估计中最重要的一部分<sup>[8-9]</sup>。

## 2.2 臭氧探空数据

臭氧探空资料来自三个探空站点（如表1），分别为拉萨、西宁和北京。其中拉萨站和西宁站使用的是进口的电化学臭氧探空仪ECC，北京站使用的是中国科学院大气物理所研制的GPS臭氧探空仪（GPSO3）。

表 1 臭氧探空站点列表

Table 1 List of ozone sonde stations

站点	经度	纬度	仪器*	时间	匹配数
拉萨	91.3	29.7	ECC (ENSCI-Z)	1998年8,10月	17
				1999年6,8,9,10月	
西宁	101.75	36.63	ECC (SPC-5A)	1996年4,7,8月	15
北京	116.39	39.79	GPSO3/IAP	2002年9,10,11,12月	19
				2003年1,3,4,5,6月	

\* ECC (type): 电化学臭氧探空仪 (型号); GPSO3/IAP: 全球定位臭氧探空仪

本文中ECC臭氧探空数据的误差估计采用的WMO报告的结果<sup>[10-11]</sup> (如表2)。国产GPSO3臭氧探空仪是一种单池KC型电化学仪器，同平行释放的Vaisala ECC的对比结果显示：12km以下GPSO3比ECC偏高约10-20%，27km以上GPSO3偏低约5-10%，在上对流层/下平流层（12-27km）二者有很好的一致性<sup>[12-14]</sup>，本文中GPSO3数据的误差估计采用和ECC相同的方案。GPSO3臭氧探空仪在北京的观测资料已被应用于验证ENVISAT卫星搭载MIPAS和GOMOS探测器观测的臭氧廓线资料<sup>[15,16]</sup>。

## 2.3 地面臭氧观测资料

拉萨，瓦里关山，临安的地面臭氧浓度是由气象系统采用美国热电子公司生产的TEI-49C型紫外吸收式臭氧分析仪观测，详细的资料描述参见相关文献<sup>[17-19]</sup>。文中采用GOME对流层最低层（约0-2.5km）臭氧资料同地面臭氧观测资料对比有一定时间和空间的局限性，因此这里利用两种资料的月平均值侧重对比分析地面臭氧浓度的月际变化。

表 2 ECC臭氧探空仪误差估计

Table 2 Error estimation of ECC ozone sonde

误差*	型号	0-5km	5-10km	10-15km	15-20km	20-25km	25-30km	30-35km
$\sigma_{sonde,md}$ [%]	ENSCI-Z	4.1	3.2	2	3.4	3.7	4.7	4.1
	SPC-5A	4	3	2	3	3	3	5
$\sigma_{sonde,acc}$ [%]	ENSCI-Z	10.4	10.2	6.8	6.2	11	16.7	13.9
	SPC-5A	6	4	8	11	12	10	14

\*  $\sigma_{sonde,md}$  为ECC精确度，为对随机误差的估计， $\sigma_{sonde,acc}$  为ECC准确度，为对系统误差的估计

### 3 方法:

#### 3.1 匹配标准和数据处理

为了匹配卫星数据和探空数据，定义二者最大的时空差别为：时间±6小时；经度±3°，纬度±1.5°；即时间最大差别为卫星通过探空释放时间的前后6小时；最大空间差别为以探空站点经纬度为中心，在长为6°经度、宽为3°纬度的矩形区域内卫星像素元中心与探空站距离最近的一对数据为匹配的廓线。

GOME反演算法所应用的最优估计技术需要一个先验估计的平均态廓线<sup>[8]</sup>，所以得到反演结果不仅仅同真实大气中臭氧的垂直分布有关，还和先验的臭氧廓线有关，而且往往是平滑的权重函数作用于整个廓线的结果<sup>[20]</sup>；臭氧探空是利用化学反应直接探测目标物的系统，垂直分辨率远高于GOME数据。为了使不同探测系统得到的数据有可比性，利用GOME数据的权重函数将高分辨率的探空数据平滑到低分辨率的GOME的垂直分辨率上<sup>[21]</sup>。

$$x_s = x_a + AK(x_t - x_a) \quad (1)$$

$x_t$  和  $x_s$  分别是原始的和经过GOME权重函数平滑过的臭氧探空廓线； $x_a$  是GOME反演中应用的先验的廓线；AK是GOME的权重函数。

#### 3.2 统计方法

文中采用von Clarmann总结的方法和定义<sup>[22]</sup>：

$$b_i = \frac{\sum_{k=1}^N [x_{GOME}(k) - x_{sonde}(k)]}{N} \quad (2)$$



3.9-5.6	3	-0.14	0.04	1.47	0.44	0.06	0.02	0.020
5.6-7.9	15	-0.25	0.04	2.18	0.65	0.17	0.06	0.000
7.9-11.2	25	-0.61	0.07	3.11	0.93	0.34	0.13	0.000
11.2-15.8	35	-0.76	0.16	4.10	1.23	0.97	0.69	0.089
15.8-22.4	41	-0.45	0.27	5.91	1.70	1.74	1.12	0.724
22.4-31.7	46	-0.22	0.37	6.36	1.85	2.49	1.82	0.999
31.7-44.8	50	0.71	0.50	4.17	1.46	3.55	5.15	1.000
44.8-63.3	50	1.86	0.60	3.65	1.31	4.25	7.86	1.000
63.3-100.0	51	2.33	0.60	2.64	1.21	4.27	9.37	1.000
100.0-130.0	51	1.63	0.52	1.87	0.77	3.74	16.39	1.000
130.0-160.0	51	0.41	0.50	1.81	0.69	3.59	10.45	1.000
170.0-230.0	51	-0.24	0.38	1.62	0.65	2.70	9.07	1.000
230.0-300.0	51	-0.40	0.21	1.40	0.62	1.47	4.89	1.000
300.0-400.0	51	-0.23	0.10	1.09	0.50	0.70	1.78	0.999
400.0-500.0	51	-0.18	0.09	1.29	0.54	0.61	1.01	0.546
500.0-地面	51	-0.16	0.09	1.81	0.63	0.62	0.71	0.061

表3给出的所有样本的统计结果显示，31.7hPa以上的系统误差和随机误差被明显高估了。在31.7hPa到300hPa，样本的标准偏差p比同一层的随机误差高2-5倍，造成卡方值远高于期望值1，特别在63.3-230hPa之间标准偏差p比同一层的系统误差明显偏高，也就是说除了随机误差和系统误差外还有其他的原因造成了大的偏差，例如匹配廓线时空差别。图1中详细讨论了不同站点的结果的区别。

表4给出了臭氧探空积分的柱总量同GOME的对比结果，柱边界为气柱的 averages 的上下气压边界，PCD为GOME臭氧柱总量相对探空积分柱总量的偏差，SD为PCD的标准偏差，随机误差为合成的随机误差，精确度为合成的估计误差。SEM为 $3\sigma_b$  标准误差用以衡量平均值的偏差即PCD的分布。三站合成随机误差都在5%左右，合成的估计误差都在14%左右，拉萨的PCD±SD同随机误差基本一致，估计误差偏高；北京的PCD，SD及SEM比拉萨，西宁明显偏高。北京偏大的PCD和SD不能完全用估计误差来解释，可能的原因在下面讨论。

表 4 臭氧积分柱总量的对比结果

Table 4 Comparisons of total column ozone of GOME and ozone sonde

站点	柱边界 [hPa]	PCD ± SD[%]	随机误差[%]	精确度[%]	SEM[%]
拉萨	3.9-590.5	0.7 ± 5.3	4.8	14.0	1.0
西宁	5.6-738.2	3.7 ± 8.7	4.9	13.9	1.8
北京	7.9-949.0	8.1 ± 21.1	5.4	14.6	4.1

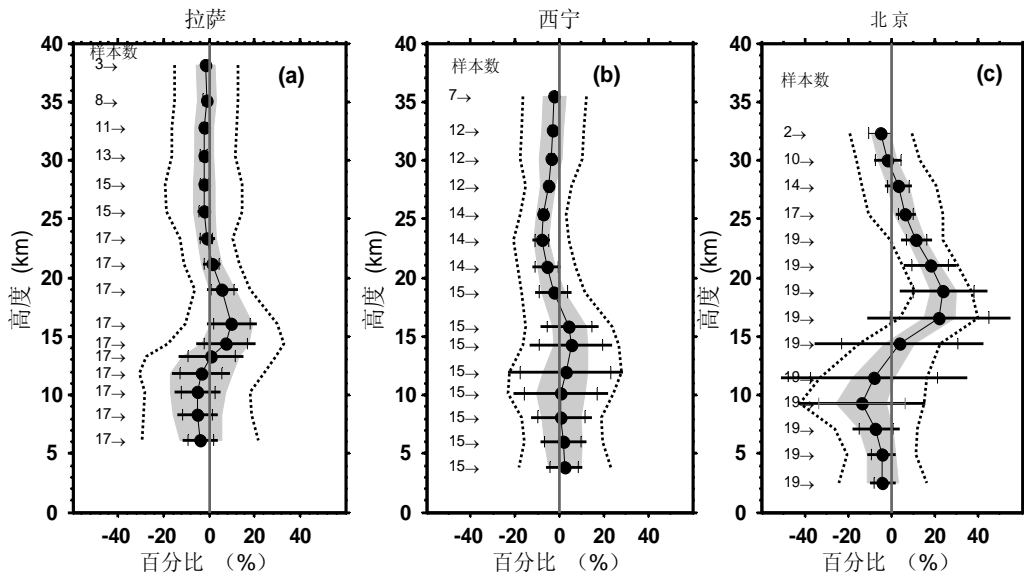


图1 GOME同3个站点臭氧探空对比，各层臭氧总量的相对偏差 $\langle \text{GOME} - \text{sonde} \rangle / \langle \text{sonde} \rangle$  (圆点线)，标准偏差 (黑细线)，3倍标准误差 (误差棒)，相对的合成的随机误差 (灰影区)，合成的误差 (虚线)，带箭头数字表示该层样本数

Fig. 1 Comparison of ozone partial column between GOME and ozone sonde at three stations. Relative bias is indicated as line with solid circles, and  $1\sigma$  standard deviation as thin line,  $3\sigma$  standard error as error bars indicating standard error of the mean, combined estimated random error as shaded areas and combined smoothing error and random error as dotted line, respectively

图1 (a-c) 分别显示了拉萨 (17对)，西宁 (15对)，北京 (19对) 的对比结果，其中包括相对偏差，标准偏差和3倍标准误差 (SEM)，同时合成的随机误差，合成的估计误差 (以上各量均为相对于探空数据的百分比) 以及每一层的样本数也显示在图上。如图1(a)拉萨的结果显示相对偏差在±10%以内，特别是在20km以上，偏差小于5%。23km以下的标准偏差和3倍标准误差同合成的随机误差表现了很好的一致性，23km以上的随机误差明显高于标准偏差和3倍标准误差，这是对臭氧探空随机误差过高的估计导致的。如图1(b)西宁的结果显示，除了23km处 (~8%)，其它各层的相对偏差都在±5%以内，19km以上标准偏差和3倍标准误差接

近或小于合成的随机误差,7-19km的标准差和 $\sigma_{acc}$ 分布是一致的,7km以下,标准差略高于 $\sigma_{md}$ ,如图1c,北京的对比结果显示14-28km为正的偏差在25%以内,其他各层为负的偏差,在15%以内,标准差和3倍标准误差均高于 $\sigma_{acc}$ ,远高于 $\sigma_{md}$ 。

北京的对比结果显示对流层中下层和平流层中上层的平均偏差在10-15%以内,标准偏差和SEM同随机误差分布一致或小于随机误差。在对流层上层和平流层下层区域,平均偏差、标准偏差和SEM都很大,达到25%。这可能是由于多数的(58%)北京探空试验用来探测冬春季上对流层/下平流层区域的平流层-对流层交换和臭氧的多层结构,这一时段北京地区大气臭氧的单峰与多峰结构交替出现<sup>[24]</sup>,反演算法应用的先验廓线不能反映这种结构变化,造成反演结果同探空数据的差异较大,而在秋季反演结果同探空表现了较好的一致性(如图2),GOME臭氧资料和北京地区气球探空资料未能一致的反映春季臭氧的垂直结构特征。另外GPSO3本身的准确度和误差估计还存在一些问题<sup>[25]</sup>,12km以下27km以上同ECC相比有较大的差别。

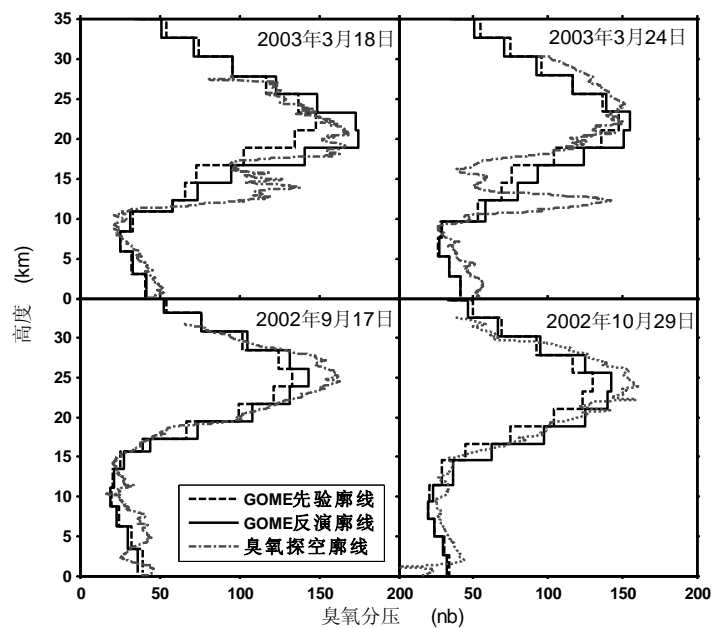


图 2 2002年秋季,2003年春季GOME臭氧资料先验廓线和反演廓线同北京臭氧探空对比

Fig. 2 Comparison of ozone partial pressure of GOME priori profiles, retrieved profiles and ozone sonde profiles(unit:nb) in the autumn of 2002 and spring of 2003

#### 4.2 对流层臭氧总量和地面浓度对比

GOME对流层臭氧反演使用的对流层顶来源于NCEP再分析资料,探空资料对流层顶高度采用WMO关于对流层顶的定义依据温度垂直递减率确定,二者对比结果如图3(a),其中拉

萨 $4.0 \pm 6.5$  百帕，西宁 $7.4 \pm 8.6$ 百帕，北京 $7.2 \pm 11.1$ 百帕（平均偏差 $\pm$ 平均值的标准差）。图3 (b) 为对流层臭氧柱总量对比结果：在拉萨的70%以上的相对偏差在10% (~3DU)以内。在西宁，67%的相对偏差在10% (~5DU)以内。北京74%的偏差在10%以内 (~4DU)。

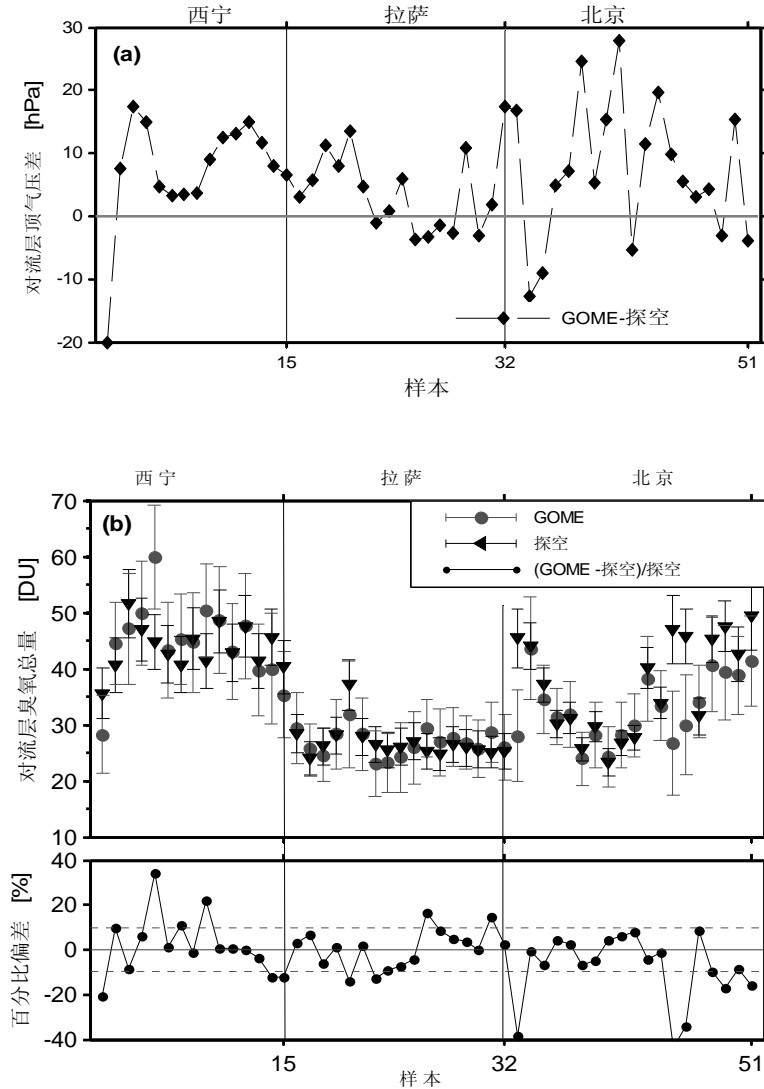


图3 GOME同西宁、拉萨和北京对流层臭氧的对比结果：(a)为GOME数据采用的对流层顶高度同由探空资料确定的对流层顶高度对比；(b)为3个站点51对廓线对流层臭氧总量对比，误差棒为各自的估计误差。

Fig. 3 Comparisons of tropopause pressure (TP) and tropospheric column ozone (TCO) between GOME retrievals and ozone sonde observations: (a) tropopause pressure; (b) tropospheric column ozone.

对流层臭氧柱总量的对比结果显示，多数样本的相对偏差在 $\pm 10\%$ 以内（约3-5DU），平均偏差 $\pm$ 标准差为 $(-3.5 \pm 16.2)\%$ 。对流层臭氧柱总量误差的一个主要来源是对流层顶高度的误差<sup>[8]</sup>，GOME对流层顶高度同探空对流层顶高度相比平均偏高4-7百帕，这造成对流层臭氧柱总量平均相差约2%-4%。

为了验证GOME观测低层臭氧浓度的可行性，文中采用GOME对流层最低层（约0-2.5km）臭氧资料同地面臭氧观测资料作初步的对比分析。首先利用（公式8）将GOME最低层柱总量（单位：DU）数据转换为该层的平均浓度（单位：体积混合比 $10^{-9}$ ）。

$$O_{3,i}(\text{混合比})=1.251 \times O_{3,i}(\text{DU}) / (P_s - P_i) \times 1013.25 \times (R / (R + Z_{\text{mid},i}))^2 \quad (8)$$

$P_s, P_i$ 分别代表地面气压和该层上边界气压，单位为hPa， $R$ 为平均地球半径， $Z_{\text{mid},i}$ 为该层平均的海拔高度，这一公式的精确度高于1%<sup>[26]</sup>。

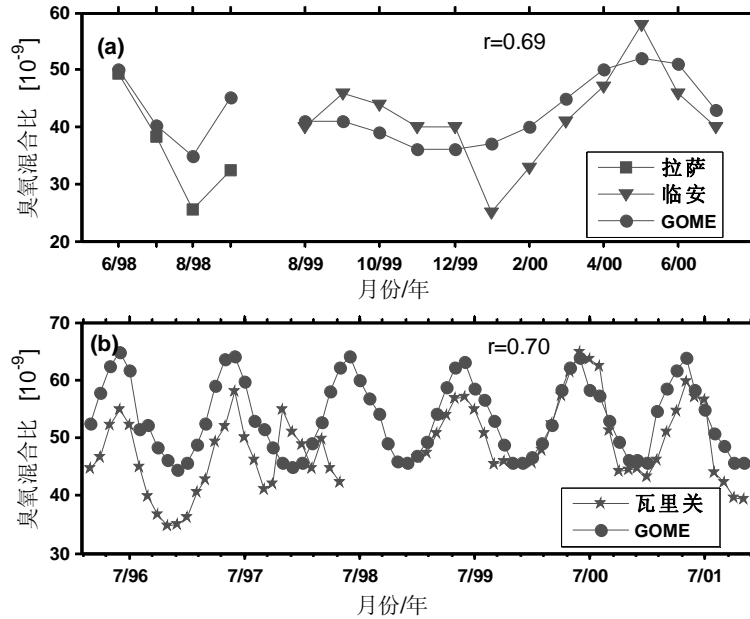


图4 GOME近地面层臭氧浓度（实心圆）同拉萨（实心方框），临安（下三角形），瓦里关山（星形）地面观测臭氧浓度的对比， $r$ 为相关系数

Fig. 4 Comparison of GOME and surface ozone concentration at Lhasa, Linan and mount Waliguan

如图4对比了拉萨，临安和瓦里关三地GOME最低层月平均臭氧浓度（体积混合比 $10^{-9}$ ）和同期观测的月平均地面臭氧浓度。拉萨月平均臭氧浓度资料时间太短仅供参考，临安和瓦里关结果表明他们的相关性均高于0.69，临安、瓦里关臭氧浓度相对偏差分别为  $(2.2 \pm 13.7)\%$ ， $(11.3 \pm 10.6)\%$ 。其中GOME结果同瓦里关1999年以后的臭氧观测资料符合很好。瓦里关山可对比的数据最多，特别是在1999年10月-2001年10月期间GOME结果同地面观测臭氧浓度具有很高的相关性(0.88)。表明GOME臭氧资料对研究高原地区对流层低层臭氧浓度的变化具有一定的参考意义。

郑向东等<sup>[27]</sup>利用臭氧探空资料分析了临安地区5km以下特别是2km以下的臭氧垂直分布，结果表明臭氧垂直分布主要有5种类型，主要受气象条件和臭氧前体物及消耗物浓度的影响。

由于2000年1月份临安地面消耗臭氧的化合物如NO<sub>x</sub>浓度偏高，通过化学反应消耗一定的地面臭氧，使地面臭氧浓度低于边界层臭氧的平均浓度；而GOME近地层臭氧浓度是0-2km的边界层平均浓度，所以两者对比GOME的臭氧浓度值明显高于地面观测值。与此类似，夏季地面附近有臭氧前体物通过光化学过程生成臭氧，所以地面臭氧浓度高于GOME的结果，例如临安5月的两者的浓度差就说明这种现象。

根据乜虹等（2004）文献中瓦里关地区地面臭氧观测数据看：既有典型的季节变化也有不规则的1996-1998年的前段下降和1999-2001年的后段上升趋势，GOME数据能够反映季节变化，对于1999-2001年的后段GOME结果同地面观测符合很好；对于1996-1998年的前段两者差别大的可能原因是：（1）瓦里关地面观测资料本身显示了一些短期的或不规则的变化，例如1996年8-9月的浓度低值和停止观测前的1998年5-6月浓度低值；（2）反演过程中在下对流层应用的先验的廓线（一般为同纬度历史观测值和探空数据），可能无法反映一些短期的变化；（3）多数月份GOME整体偏高或偏低与地面臭氧值的系统性的不一致可能是由边界层内臭氧浓度的垂直分布不同，导致GOME最低层臭氧浓度同地面浓度的差异，此外GOME对下对流层臭氧灵敏度较低也有关系。迄今为止还没有利用卫星观测资料精确反演近地面层，甚至是对流层臭氧的方法，现有方法的误差一般都在20%-30%左右。同地面观测相比较高的相关性说明GOME数据对于研究大范围近地面臭氧变化还是有参考意义的，但对于长期变化的研究还有局限性。

## 5 结论

本文利用3个探空站点共51条臭氧探空资料分析验证了GOME臭氧垂直廓线和对流层臭氧总量，同时对比了地面观测臭氧同GOME近地面层臭氧。采用GOME权重函数将高垂直分辨率的气球探空臭氧廓线平滑到低垂直分辨率的GOME垂直网格上以减少不同分辨率数据对比时的数据平滑误差，给出基于统计意义的量化结果，得到主要结论如下：

1. 垂直分布对比结果表明，GOME与臭氧探空的平均偏差、标准偏差和SEM随高度变化。标准偏差和SEM在对流层中上层较大，到平流层逐渐减小。
2. 青藏高原地区（拉萨，西宁）GOME资料廓线同臭氧探空廓线有很好的一致性，平均偏差都在10%以内，北京对比结果偏差在10%-25%。
3. GOME对流层臭氧总量同三站点臭氧探空相比平均偏高3.5%，由于采用统一的反演方法且具有较高的精度，GOME对流层臭氧柱总量资料可以用于研究中国不同地区臭氧的季节变化规律。
4. GOME近地面层臭氧浓度比拉萨，瓦里关，临安地面观测值平均偏高约10%

总之， GOME臭氧资料与探空和地面观测结果的对比显示了很好的一致性，特别在高原地区GOME与臭氧探空的相对误差很小，该资料适用于分析中国特别是青藏高原地区的臭氧的垂直结构及水平分布。

**致谢：**感谢中国科学院大气物理研究所石广玉研究员、日本金泽大学Iwasaka教授提供了拉萨地区臭氧探空数据；感谢中国科学院大气物理研究所王庚辰研究员、陈洪斌研究员、吕达仁研究员提供了北京臭氧探空数据；感谢卞建春研究员提出了有益的建议。

### 参考文献

- [1] Chance, K. V., Burrows, J. P., Perner, D., Schneider, W. Satellite measurements of atmospheric ozone profiles, including tropospheric ozone, from ultraviolet/visible measurements in the nadir geometry: A potential method to retrieve tropospheric ozone[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1997, 57(4):467~476.
- [2] Munro, R., R. Siddans, W. J. Reburn, and B. Kerridge. Direct measurement of tropospheric ozone from space[J]. *Nature*, 1998, 392:168~171.
- [3] Hoogen, R., V. V. Rozanov, and J. P. Burrows. Ozone profiles from GOME satellite data: Algorithm description and first validation[J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(7):8263~8280.
- [4] Hasekamp, O. P., and J. Landgraf. Ozone profile retrieval from backscattered ultraviolet radiances: The inverse problem solved by regularization[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(8):8077~8088.
- [5] Van der A, R. J., R. F. van Oss, A. J. M. Pijpers, J. P. F. Fortuin, Y. J. Meijer, and H. M. Kelder Ozone profile retrieval from recalibrated GOME data[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107(15):4239.
- [6] Muller, M. D., A. K. Kaifel, M. Weber, S. Tellmann, J. P. Burrows, D. Loyola. Ozone profile retrieval from Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) data using a neural network approach (Neural Network Ozone Retrieval System (NNORSY)) [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(16):4497.
- [7] Rodgers, C. D. Inverse Methods for Atmospheric sounding: Theory and practice[J]. World sci., 2000.
- [8] Liu, X., Chance, K., Sioris, C. E. et al. Ozone profile and tropospheric ozone retrievals from the Global Ozone Monitoring Experiment: Algorithm description and validation[J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110:D20307.
- [9] Liu, X., Chance, K., Sioris, C. E. et al. Intercomparison of GOME, ozonesonde, and SAGE II measurements of ozone: Demonstration of the need to homogenize available ozonesonde data sets[J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111(D14).
- [10] Smit HGJ, K. D. Julich Ozone Sonde Inter-comparison Experiment-1996 (JOSIE-1996) [J]. Global Atmosphere Watch Report Series, 1998, No. 130. WMO/TD-No. 926. Geneva: WMO, 1998. 38~44
- [11] Herman G. J. Smit, Wolfgang Straeter. JOSIE-1998 Performance of ECC Ozone Sondes of SPC-6A and ENSCI-Z Type [J]. Global Atmosphere Watch Report Series Geneva, 2004, No. 157. WMO / TD. No. 1218.
- [12] 宣越健, 马舒庆, 陈洪滨 国产 GPS03 与芬兰 Vaisala 臭氧探空仪的比对试验 [J]. *高原气象*, 2004, 23(3):394~399.
- [13] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健. GPS03 和 Vaisala 臭氧探空仪平行施放对比结果的初步分析 [J]. *应用气象学报*, 2004, 15(6):672~680.
- [14] Bian, J., Gettelman, A., Chen, H. Validation of satellite ozone profile retrievals using Beijing ozonesonde data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112.D06305
- [15] Cortesi, U., Lambert, J. C., Clercq, C. D., Bianchini, G., Blumenstock, T., Bracher, A., Castelli, E., Catoire, V., Chance, K. V., Mazière, M. D., Demoulin, P., Godin-Beekmann, S., Jones, N., Jucks, K., Keim, C., Kerzenmacher, T., Kuellmann, H., Kuttippurath, J., Y., M. I. G., Liu, Y., Liu, I., McDermid, S., Meijer, Y.

- J., Mencaraglia, F., Mikuteit, S., Oelhaf, H., Piccolo, C., Pirre, M., Raspollini, P., Ravegnani, F., Reburn, W. J., Redaelli, G., Remedios, J. J., Sembhi, H., Smale, D., Steck, T., Taddei, A., Varotsos, C., Vigouroux, C., Waterfall, A., Wetzel, G. and Woo, S. 2007. Geophysical validation of MIPAS-ENVISAT operational ozone data. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 4807~4867.
- [16] Yi Liu, Zhaonan Cai, Erkki Kyrola. Comparison of ENVISAT GOMOS and MIPAS ozone profiles with balloon sonde measurements from Beijing, 2008, ESA Special Publication (SP-655).
- [17] Wang, T., Cheung, T. F., Li, Y. S. Emission characteristics of CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and indications of biomass burning observed at a rural site in eastern China[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107(D12).
- [18] 乜虹, 牛生杰, 王治邦, 汤洁, 赵玉成. 青藏高原清洁地区近地面层臭氧的特征分析[J]. *干旱气象*, 2004, 22(1):1~7.
- [19] 汤洁, 周凌晞, 郑向东, 周秀骥. 拉萨地区夏季地面臭氧的观测和特征分析[J]. *气象学报*, 2002, 60(2):221~229.
- [20] Rodgers, C. D. Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95(D5):5587~5595.
- [21] Rodgers, C. D., Connor, B. J. Intercomparison of remote sounding instruments[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(D3):4116~4229.
- [22] Von Clarmann, T. Validation of remotely sensed profiles of atmospheric state variables: strategies and terminology[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, 6:4311~4320.
- [23] Bevington, B. R. Data reduction and error analysis for physical sciences 3rd edition. McGraw-Hill Book Company, New York, 2003, 51~71.
- [24] 王庚辰, 孔琴心, 陈洪斌, 宣越健, 万小伟. 北京上空大气臭氧垂直分布的特征[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(5):743~748.
- [25] 郑向东, 李伟. 国产臭氧探空仪观测数据质量分析[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(5):608~618.
- [26] Ziemke, J. R., S. Chandra, et al. (2001). "Cloud slicing": A new technique to derive upper tropospheric ozone from satellite measurements." *J. Geophys. Res.* **106**(D9): 9853~9868.
- [27] ZHENG Xiangdong, C. C., CUI Hong, QIN Yu, CHAN Luyan, ZHENG Yongguang & LEE Yusiang. Characteristics of vertical ozone distribution in the lower troposphere in the Yangtze River Delta at Lin'an in the spring of 2001[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2005, 48(9):1519~1528.