

郑向东. 云对中国区域卫星观测臭氧总量精度影响的检验分析. 大气科学, 2008, 32 (6): 1431~1444

Zheng Xiangdong. Investigation on effect of cloud on the precision of total ozone from satellite measurements over China regions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (6): 1431~1444

# 云对中国区域卫星观测臭氧总量精度影响的检验分析

郑向东

中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘 要** 根据卫星和地基观测, 比较了我国香河、昆明、瓦里关和龙凤山四个站点臭氧总量自 1979 年以来的变化。卫星与地基观测的臭氧总量长期趋势比较一致, 表明臭氧总量均有下降趋势, 但是卫星与地基各自观测的结果仍存在着显著的差别。为研究卫星与地基臭氧总量的差别, 以地基观测臭氧总量为参考, 检验云对历史 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 和 GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) 臭氧总量精度的影响。结果显示: 云 (云量或云顶高度) 增加了卫星臭氧总量误差, 降低数据精度。随着地面云量的增加, TOMS、GOME 臭氧总量相对误差在上述四个地点呈现明显的上升趋势 (瓦里关最为明显), 但最大变化幅度没有超过 2.0%。TOMS 臭氧总量相对误差随地面云量变化呈现区域性特点, 香河与龙凤山 (代表着中纬度高臭氧总量区域)、昆明与瓦里关 (代表中、低纬度高原低臭氧总量区域) 分别为两个变化特点接近的区域。GOME 臭氧总量相对误差与云之间关系的区域特征不明显。利用卫星遥测 FRESCO (Fast Retrieval Scheme for Clouds from the Oxygen A-band) 云信息检验 GOME 卫星臭氧总量精度的表明, 只有当云量大于 5 成后 GOME 臭氧总量才显示出相对误差增加的现象, 但无明显趋势; 随着 FRESCO 云顶高度的增加, GOME 臭氧相对误差在香河、瓦里关均呈现明显的上升趋势并有 3% 左右幅度的变化。TOMS 臭氧总量相对误差随着地面有效反射率的增加而增大, 且误差幅度超过 2%; TOMS-N7 臭氧总量比 TOMS-EP 约高 2.0%~3.0%。分析还表明, 云内和云以下臭氧柱浓度在反演的卫星臭氧总量中的贡献很可能被高估了。

**关键词** 卫星臭氧总量 相对误差 云量 云顶高

**文章编号** 1006-9895 (2008) 06-1431-14

**中图分类号** P421

**文献标识码** A

## Investigation on Effect of Cloud on the Precision of Total Ozone from Satellite Measurements over China Regions

ZHENG Xiangdong

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract** Long-term variations of total ozone at 4 proxy sites in China, Xianghe (XH), Kunming (KM), Mt. Waliguan (WLG) and Longfengshan (LFS), are investigated with ground- and space-based observations. Although there is an evident decreasing trend of total ozone since 1979 over the sites, the differences of total ozone between satellite and ground-based observations are distinguishable. The effect of cloud on the precision of total ozone from satellite measurements is analyzed with the reference of corresponding ground-based total ozone. The absolute errors

**收稿日期** 2007-04-05, 2007-07-03 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40375005, 科技部社会公益性基础研究专项 2001DIA10009

**作者简介** 郑向东, 男, 1968 年出生, 理学博士, 研究员, 主要从事与大气臭氧有关的探测研究工作。E-mail: zhengxd@cma.gov.cn

of satellite total ozone data sets definitely increase in cloudy condition. Relative errors of satellite total ozone also exhibit their obvious increasing trends with growth of ground-scene cloud fractions, particularly at WLG, however the maximum of all the errors are less than 2%. Relative errors of TOMS total ozone vs. ground-scene cloud fraction show similar variation trend at XH and LFS where the sites are located in the typical middle latitude regions with climatology of high total column ozone, and the similar trend is also detected at KM and WLG where the sites are located in typical low latitude mountain regions with climatology of relatively low total column ozone. The relative errors of GOME total ozone vs. ground-scene cloud fraction do not indicate any regional attributes. The relative errors of GOME total ozone vs. FRESCO cloud fraction and cloud top height suggests that there is no obvious trend in the errors of GOME total ozone, and the errors increase only when the FRESCO cloud fraction is more than 50%. With the growth of FRESCO cloud top height, the relative errors of GOME total ozone exhibit an obvious increasing trend at XH and WLG with maximum around 3%. With the growth of TOMS effective reflectivity, the relative errors of TOMS total ozone increase with the maximum more than 2%. Generally, the TOMS-N7 total ozone over China is 2.0%-3.0% higher than that of TOMS-EP. It is speculated that there is a high possibility that the contribution of ozone within or below the cloud to the satellite total ozone has been over-estimated in the retrieval algorithms of satellite total ozone.

**Key words** satellite total ozone, relative error, cloud fraction, height of cloud top

## 1 引言

晴天大气后向散射主要是以分子瑞利散射为主。云的出现使得后向紫外散射增强。云也使得大气臭氧（还包括气溶胶、二氧化硫以及二氧化氮等）对紫外后向散射的吸收发生了变化：云内和云顶以上对后向散射吸收增强，而云底以下的吸收减弱。因此，云的出现不可避免地给基于卫星后向紫外散射测量所反演的臭氧总量（还包括其他成分，如二氧化氮、二氧化硫、气溶胶等）精确度带来了干扰。

早期对 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 卫星 6.0 版本臭氧总量产品验证时，就注意到海洋性的层积云使得臭氧总量高于实际的地基测量结果<sup>[1]</sup>，这是因为反演 TOMS 臭氧总量过程中，简单地认为云顶的高度仅与纬度有关，而与云的类型、厚度以及与云出现的地区无关。TOMS 7.0 版本中采用了 ISCCP (International Satellite Climatology Project) 实测的月平均云量和云高的数据资料，提高了数据的精度<sup>[2]</sup>。但是由于 TOMS 7.0 版本产品仍不是实时遥感的云量和云高数据，由云引起的 TOMS 臭氧总量的误差依然存在。Newchurch 等<sup>[3]</sup>和 Liu 等<sup>[4]</sup>则进一步指出，云对 TOMS 臭氧总量的绝对误差贡献一般在 1~15 DU 左右，对于中、高纬度地区中尺度的强对流天气系统区域而言，绝对误差可能高达 40 DU 左

右。在 2004 年发布的 TOMS 8.0 版本 (V8) 臭氧总量产品中，对云处理还参考了 THIR (Temperature Humidity Infrared Radiometer) 云的产品资料<sup>[5]</sup>。

GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) 采用 DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) 方法反演大气臭氧斜柱总量，而大气臭氧斜柱总量除以大气质量因子 (Air Mass Factor, 简称 AMF) 得到了 (垂直) 臭氧总量<sup>[6]</sup>。云的出现使得 AMF 组成需要考虑云顶到大气上界、云的厚度及地面到云底这三部分，从而影响了 GOME 臭氧总量的产品精度。

本文根据我国香河、昆明、瓦里关和龙凤山站点的卫星和地基长期观测臭氧总量，分析比较四个地点臭氧总量的长期变化。在这基础上以地基臭氧总量为标准参考值，了解 TOMS 和 GOME 臭氧总量的精度受云影响的状况。香河、昆明是我国最早利用 Dobson 光谱仪开展臭氧总量业务观测站点<sup>[7, 8]</sup>；瓦里关山和龙凤山站则是 20 世纪 90 年代后采用 Brewer 光谱仪开始业务观测的站点。本文工作旨在获取云对卫星臭氧总量误差影响的检验结果，了解长期卫星臭氧总量数据在我国不同地区的精度状况，为利用卫星遥感产品评估臭氧总量长期的变化趋势提供相关数据质量信息。了解云对卫星反演臭氧总量精度也有助于了解和应用卫星所反演的对流层臭氧柱浓度质量，因为云顶高度

和云量是卫星反演对流层臭氧柱浓度时不可缺少的基本信息<sup>[9, 10]</sup>。

## 2 数据及相关定义

本文主要分析香河、昆明、瓦里关以及龙凤山四个站点的地基长期臭氧总量观测结果。卫星臭氧总量数据包括 TOMS 8.0 反演算法的 TOMS-N7 (Nimbus-7; 1979~1993 年)、TOMS-M3 (Meteorological-3; 1991~1993 年)、TOMS-EP (Earth probe; 1996~2002 年) 和 GOME (1995~2003 年) 臭氧总量。TOMS-EP 臭氧总量数据截止到 2002 年底是因为 2003 年以后卫星仪器出现故障导致在中、高纬度地区臭氧总量出现较大的误差缘故<sup>[11]</sup>。GOME 臭氧总量是通过 TOGOMI (Total Ozone algorithm for GOME using the OMI algorithm) 算法重新反演 GOME 原始数据得到的数据<sup>[12]</sup>。

云的数据来自三个方面: (1) 站点一日三次目测云总量的日平均值。由于香河离北京比较近, 本文以北京观测的云量来代替香河的数据; (2) 卫星观测的云量和云高数据, 本文仅检验 GOME 臭氧总量精度时利用 FRESCO (Fast Retrieval Scheme for Clouds from the Oxygen A-band) 方法反演的云量和云高的数据<sup>[13]</sup>; (3) TOMS 臭氧总量产品中提供的有效反射率值。严格地说, 有效反射率不能等同于云量, 因为它是基于假设云顶面为一朗伯特反射面而获取的反射率, 在本文中主要利用它检验 TOMS-N7 和 EP 卫星臭氧总量的精度。

对于云量和晴天的定义如下: 本文按 10% 为一个单位, 用百分数表示云量; 地面常规云量 0~10 分别对应为 0~100%。参考 Newchurch 等<sup>[10]</sup>对晴天判断的阈值: 当 TOMS 反射率低于 20% 时即归类为晴天。以此, 当地面观测的日平均云量小于 20% 时, 在本文也被归类为晴天。

根据误差的相关定义, 并参考 Smit 等<sup>[14]</sup>在对比实验中的分析方法, 本文对卫星臭氧总量的精度 (precision) 遵循以下几个定义:

(1) 卫星臭氧总量绝对误差: 卫星臭氧总量减去相应的地基臭氧总量 (单位: DU); 卫星臭氧总量的绝对精度 (absolute precision): 卫星臭氧总量绝对误差的标准偏差 (standard deviation) (单位: DU)。

(2) 卫星臭氧总量相对误差: 卫星臭氧总量绝

对差与地基臭氧总量比值的百分数 (%) ; 卫星臭氧总量的相对精度 (relative precision): 卫星臭氧总量相对误差的标准偏差 (%)。

## 3 结果分析

### 3.1 卫星和地基观测臭氧总量的长期变化特征

图 1 给出香河、昆明、瓦里关和龙凤山四个站点卫星和地基观测臭氧总量长期趋势特征。考虑到数据缺测因素, 在数据长期变化特征信息的提取上, 本文采用计算相对比较简单、可以允许数据序列缺测的 Rao 和 Zurbenko (RZ) 滤波方法<sup>[15~17]</sup>。滤波周期设为  $365 \times 3^{1/2}$  (约 632) 天, 这样可以过滤掉时间尺度为一年半以上的干扰信号, 以提取臭氧总量变化的长期特征趋势信息。从图 1 可以看出, 四个站点 1979 年以来臭氧总量基本呈下降趋势。1995 年前后香河、昆明和瓦里关山地区的臭氧总量有一定回升。在香河, 卫星和地基观测时间序列长度基本上接近, 且在 1979~1986 年间 TOMS-N7 的臭氧总量要高于地基的测值。1989 年以后在昆明, TOMS-N7 臭氧总量要明显高于地基 Dobson 臭氧总量。1997 年以后, TOMS-EP 和 GOME 卫星臭氧总量在香河、昆明低于 Dobson 的测值, 但在 1999~2001 年期间, 瓦里关和龙凤山站的 Brewer 臭氧总量要明显低于卫星的测值。从图 1 还可看出, 卫星与地基观测到的臭氧总量长期变化特征的差别反映卫星臭氧总量数据上存在系统性的误差。对这一误差的贡献因素很多, 其中云的出现便是误差贡献的因素之一。

### 3.2 晴天与云天情况下卫星臭氧总量精度的比较

首先, 调查晴天和云天情况下卫星臭氧总量精度的情况 (表 1)。表 1 中每行数据由卫星臭氧总量的平均绝对误差、绝对精度以及样本统计数组成。可以看出, 大部分情况下卫星臭氧总量在云天里要比晴天里更偏离标准值; 卫星臭氧总量精度 (标准差) 云天里也是低于晴天的值。以 TOMS-N7 臭氧总量为例, 云天里, 香河、昆明、瓦里关的绝对精度要比晴天里低 1.7、2.0、1.1 DU。云对 GOME 臭氧总量精度影响较大的是在香河和龙凤山, 分别为 13.0 DU 和 17.6 DU, 各自比晴天里低 4.8 DU 和 6.2 DU。从表 1 还注意到: 除昆明外, GOME 臭氧总量绝对精度基本超过  $\pm 8.0$  DU, 明显低于 TOMS 产品。造成这种现象的原因目前还不是很

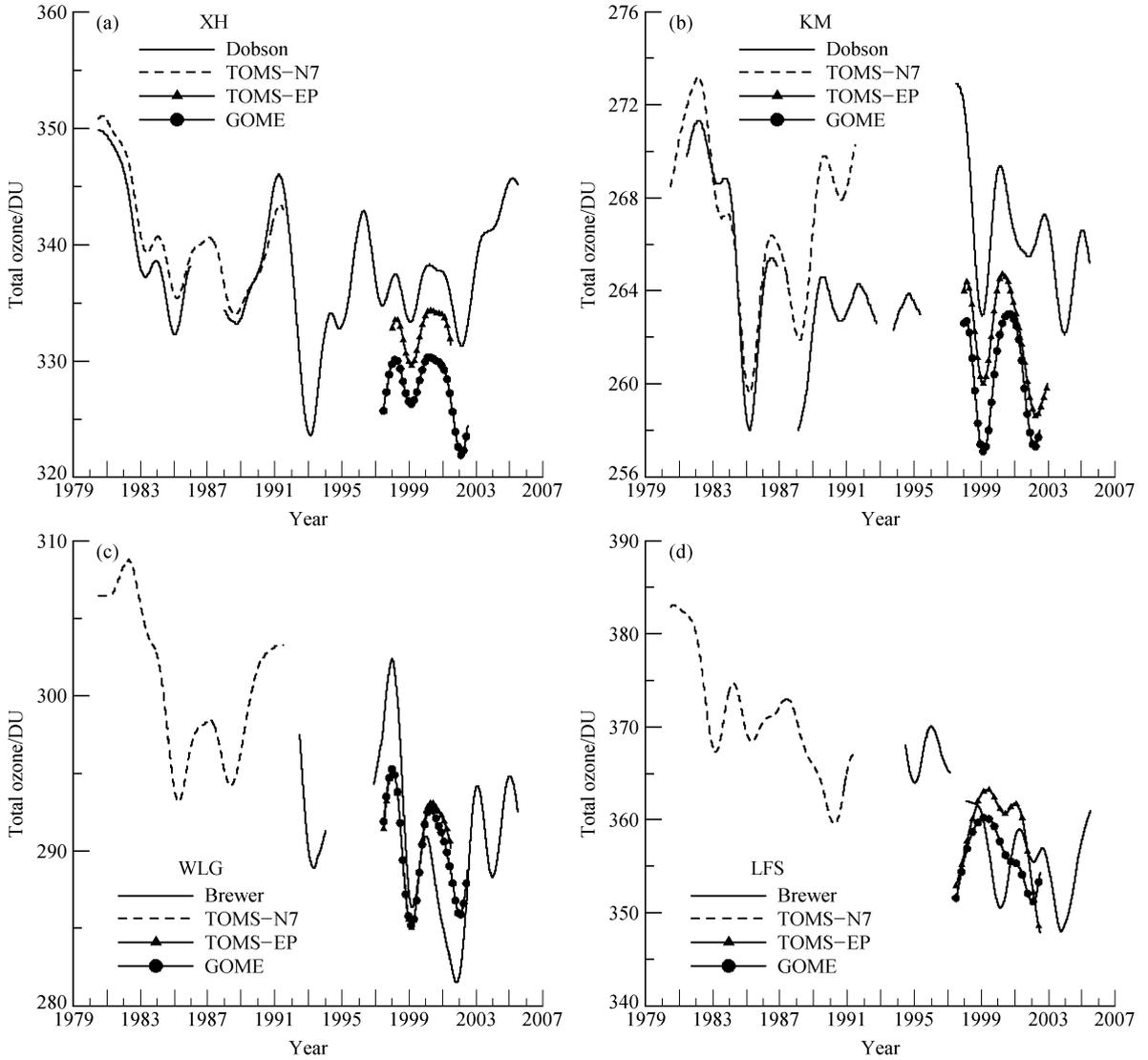


图1 (a) 香河(XH)、(b) 昆明(KM)、(c) 瓦里关(WLG)和(d) 龙凤山(LFS)臭氧总量的长期变化趋势特征  
Fig. 1 Long-term trend characteristics of total ozone from ground- and space-based observations over (a) Xianghe (XH), (b) Kunming (KM), (c) Mt. Waliguan (WLG) and (d) Longfengshan (LFS)

表1 晴天和云天情况下卫星臭氧总量绝对误差和绝对精度的比较分析

Table 1 Absolute errors and precisions of satellite total ozone under ground-scene clear and cloudy sky conditions

站点	卫星名称							
	TOMS-N7 (V8)		TOMS-M3 (V8)		TOMS-EP (V8)*		GOME (TOGOMI)	
香河	2.7±7.7/1352	<b>3.2±9.5/2223</b>	-2.4±8.5/195	<b>-2.9±10.8/260</b>	-2.7±7.2/669	<b>-1.8±8.2/918</b>	-5.4±8.2/301	<b>-3.6±13.0/416</b>
昆明	0.12±5.8/862	<b>1.8±7.8/1956</b>	-2.6±5.9/112	<b>0.01±6.8/278</b>	-6.8±6.6/354	<b>-6.9±8.7/920</b>	-6.1±8.1/160	<b>-7.3±8.5/446</b>
瓦里关	-5.7±5.4/101	<b>-3.0±6.5/303</b>	-7.4±7.7/135	<b>-7.4±7.0/277</b>	1.6±7.6/443	<b>5.6±9.0/1037</b>	2.8±11.0/347	<b>5.3±13.0/847</b>
龙凤山			0.7±10.3/73	<b>0.9±14.0/132</b>	0.7±9.3/357	<b>0.8±11.2/1143</b>	-2.6±17.4/305	<b>0.64±17.6/996</b>

注：“/”后面的数字表示样本比较数；黑体为云天观测结果的比较；“\*”表示仅采用1996~2002年的卫星臭氧总量数据。

清楚。根据表1中绝对精度数值可以计算出云天里 TOMS 系列产品在上述四个地点的精度比晴天里

分别低 1.7、1.7、1.4、1.9 DU；GOME 精度相应低了 4.8、0.4、2.0、6.2 DU。

### 3.2 云天卫星臭氧总量相对误差及其与地面云量的统计关系

为了给出卫星臭氧总量在云天里的误差分布整体情形，图 2 给出四个站点的 TOMS 和 GOME 臭氧总量在云天里的误差时间序列，从图中可以看出：TOMS 卫星臭氧总量误差在香河没有明显的趋势特征（图 2a），但在昆明 1996~2002 年 TOMS-EP 的相对误差明显低于 1979~1993 年 TOMS-N7 的相对误差（图 2c）。在以 Brewer 观测为参考的瓦

里关（图 2e）或龙凤山站点（图 2g），TOMS-EP 卫星臭氧总量在云天里的相对误差主要分布在 -10%~5% 范围；2002 年下半年瓦里关山 TOMS-EP 相对误差则有上升趋势，而在龙凤山站这种趋势不明显。云天里 GOME 卫星臭氧总量相对误差离散度比 TOMS 要大一些，其中瓦里关山或龙凤山的离散度又要大于香河、昆明。从图 2 还可看到，云天里卫星臭氧总量相对误差显示出一定的季节性变化，这在数据时间序列比较短的瓦里关或龙凤山较

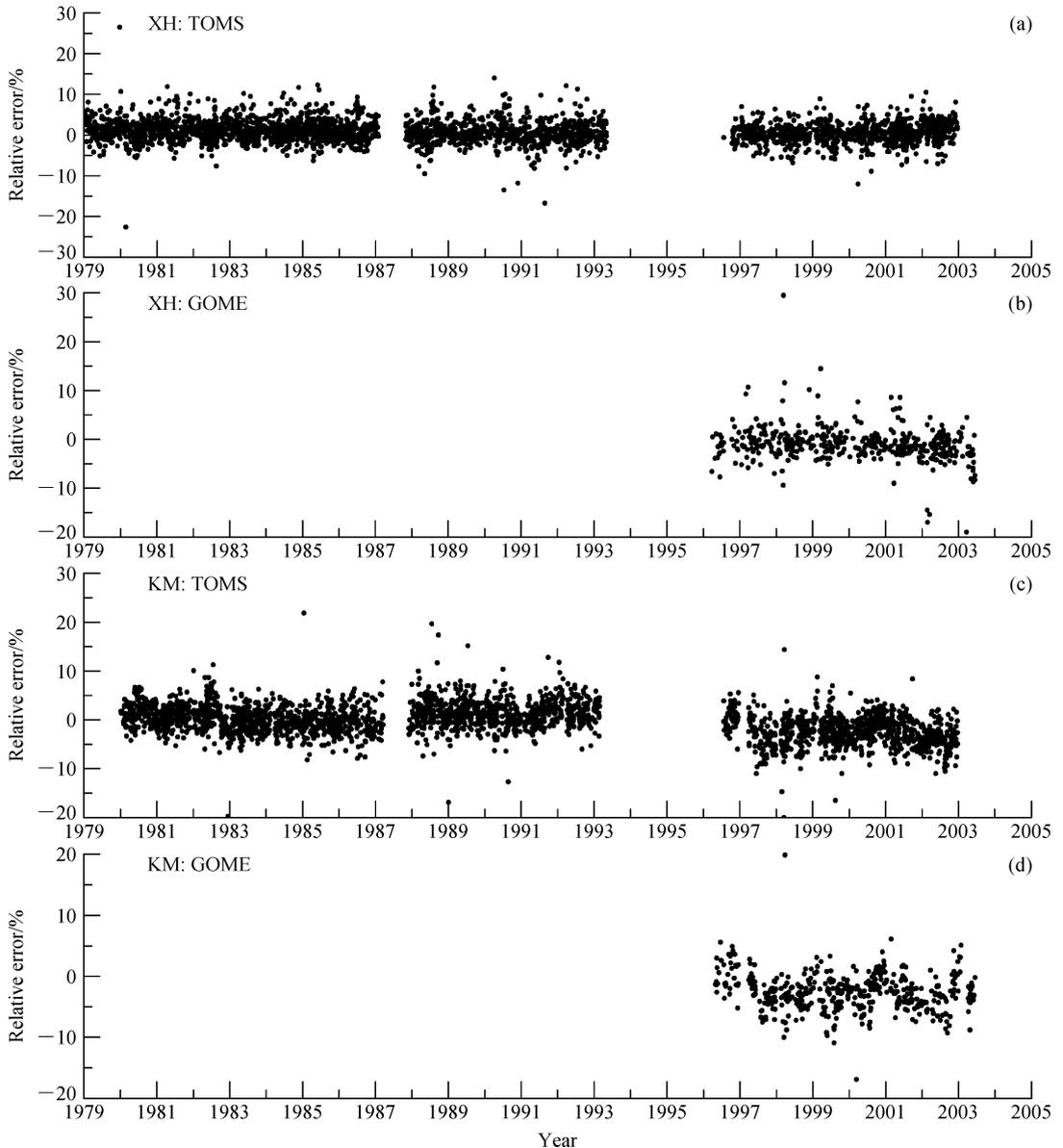


图 2 云天 TOMS (a, c, e, g) 和 GOME (b, d, f, h) 卫星臭氧总量相对误差时间序列图：(a, b) 香河；(c, d) 昆明；(e, f) 瓦里关；(g, h) 龙凤山

Fig. 2 Time series of relative errors of total ozone for (a, c, e, g) TOMS and (b, d, f, h) GOME to ground-based observations under condition of cloudy sky: (a, b) XH; (c, d) KM; (e, f) WL; (g, h) LFS

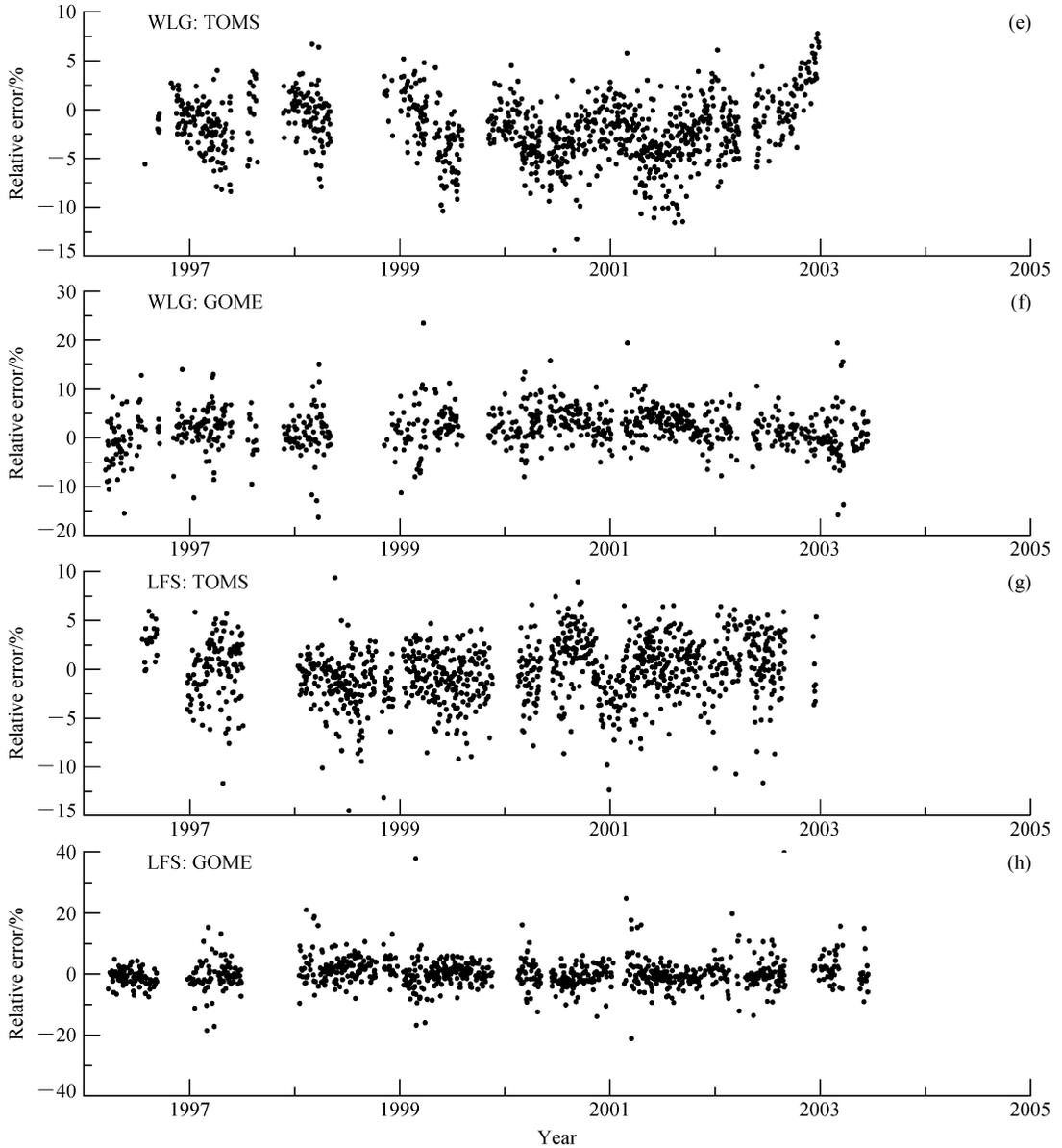


图2 (续)

Fig. 2 (Continued)

明显。

图2是一个包括云在内的多种因素对卫星臭氧总量的误差贡献情况,而云对臭氧总量相对误差的贡献还应包括云量、云高等信息。为了检验卫星臭氧总量相对误差对云量变化是否存在明显关系,图3给出四个站点 TOMS-N7、TOMS-EP 和 GOME 臭氧相对误差与地面观测云量变化关系,图中竖线为标准偏差(相对精度)。从图3看出,卫星臭氧总量相对误差随着云量增加有一个整体趋势特征:即地面云量从0上升到100%时,相对差值有1%~

2%左右变化,且呈上升趋势。昆明的 TOMS-N7 臭氧总量或瓦里关的 GOME、TOMS-EP 臭氧总量的这种趋势比较明显。GOME 臭氧总量相对误差与 TOMS 的数据相比,在总体趋势接近的情况下,仍有些不同,如在昆明,当平均云量大于 90% 时, GOME 卫星的臭氧总量相对误差是下降的。此外,我们还看到除香河外,其他三站点的卫星臭氧总量的相对误差在晴天里均有较大幅度的变化。随着地面观测云量的增大,卫星臭氧总量的相对精度在降低,而且 GOME 在总体上要低于 TOMS 系列;

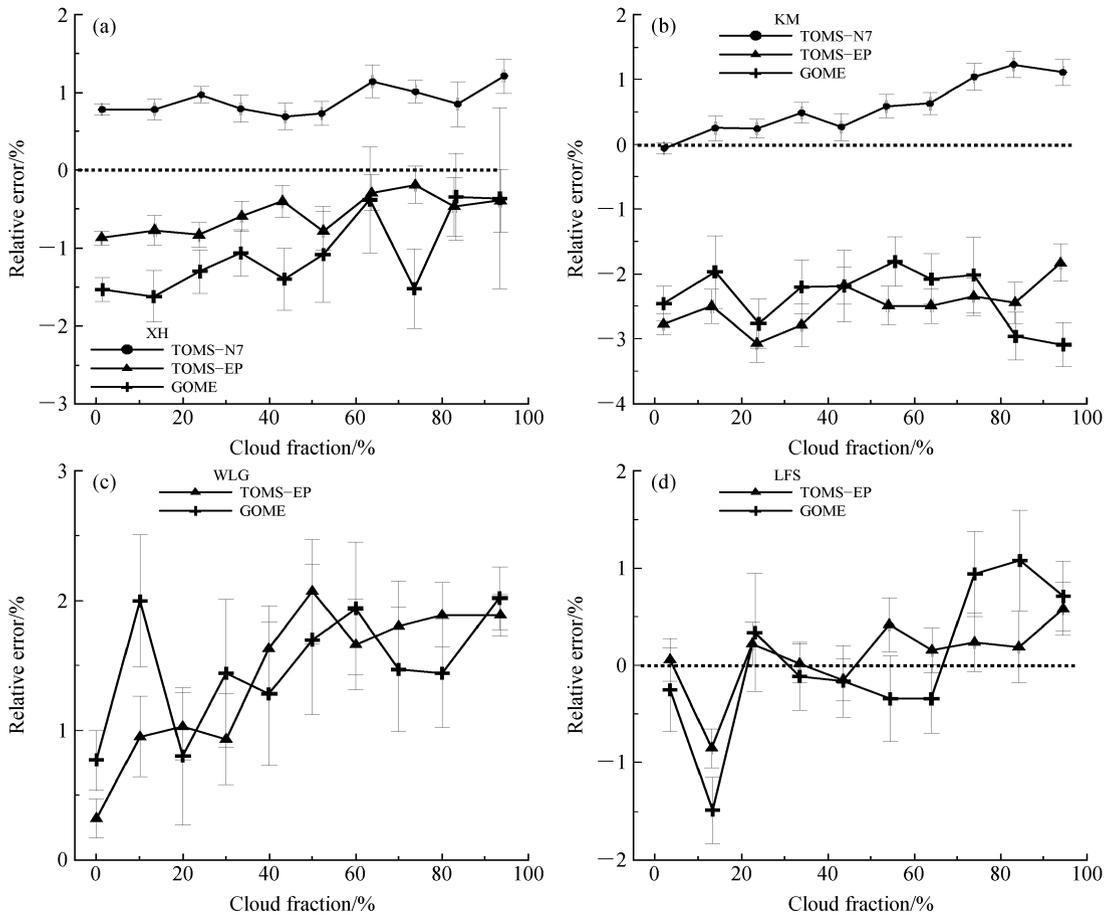


图 3 卫星臭氧总量相对误差 (含标准偏差) 与地面观测日平均云量变化的关系: (a) 香河; (b) 昆明; (c) 瓦里关; (d) 龙凤山。云量的数目统计以 10% 为单位递增, 每个统计样本数至少 20 以上

Fig. 3 The averages of relative errors (with  $\pm 1$  standard deviation) of total ozone from the satellite to ground-based observations as a function of ground-scene daily mean cloud fraction (in 10% bins): (a) XH; (b) KM; (c) WLG; (d) LFS. Each point in the function curve represents at least 20 matchups

TOMS-N7 臭氧总量在香河、昆明的精度又明显高于 TOMS-EP。

根据 TOMS-N7 (Version 7.0) 产品的分析, McPeters 和 Labow<sup>[2]</sup> 认为卫星反演臭氧总量误差对云的依赖性主要是因为两者均受天气过程、大气环流季节性等因素的影响。当有来自高纬度地区的高空低压槽天气系统时, 空气干燥, 天气晴朗, 云量减少, 对流层顶高度降低, 平流层向下延伸, 导致臭氧总量增加; 相反, 当有来自低纬地区高空反气旋天气系统时, 空气潮湿, 对流层顶升高, 天气云量增加甚至阴雨, 云量增加, 平流层被抬高, 臭氧总量减少。大气环流的季节变化则主要是通过全球尺度平流层的 Brewer-Dobson 环流影响臭氧总量的季节分布变化, 与此相适应的是对流层的云量

和云高也会呈现季节分布变化的特征。图 4 为昆明和龙凤山两个站点臭氧总量与云的关系, 从图中可以看出, 龙凤山臭氧总量随云量增加有一个下降趋势, 当云量大于 60% 时特别明显; 在昆明则相反, 即云量增加臭氧总量也是增加的。香河的臭氧总量与云的关系与龙凤山站类似, 而瓦里关这种统计关系没有趋势特征 (图略)。图 3 没有考虑臭氧总量与云量的关系可能给检验结果带来的影响, 尤其是昆明这样的站点。因此, 进一步考虑云对卫星臭氧总量精度的影响时, 云与臭氧之间存在的相关关系需要考虑。

长期的地基臭氧总量观测表明: 香河、昆明、瓦里关山、龙凤山站的臭氧总量平均值为  $338 \pm 38$ 、 $265 \pm 20$ 、 $290 \pm 26$ 、 $356 \pm 49$  DU, 本文将地基臭氧

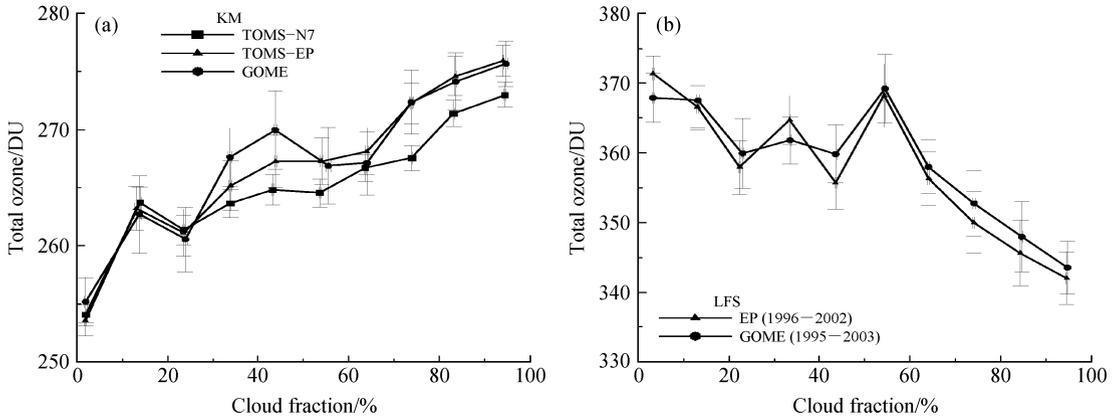


图4 (a) 昆明和 (b) 龙凤山臭氧总量 (含标准偏差) 与地面日平均云量变化长期观测的统计关系 (每个可比的统计样本数至少 20 以上)  
Fig. 4 Average of ground-based total ozone (with  $\pm 1$  standard deviation) over (a) KM and (b) LFS as a function of ground-scene daily mean cloud fraction (in 10% bins). Each point in the function curve represents at least 20 matchups

总量在上述四个地点分别固定在  $335 \pm 5$ 、 $265 \pm 5$ 、 $290 \pm 5$ 、 $355 \pm 5$  DU 的范围, 来看 TOMS 臭氧总量相对误差与地面观测云量之间的关系 (图 5)。从图 5 可以看出, 在香河与昆明两地 TOMS-N7 和 TOMS-EP 臭氧总量相对误差随地面云量的变化各自有着相近的函数曲线, 反映了 TOMS 8.0 版本的算法在反演 TOMS-N7 和 TOMS-EP 臭氧总量过程中对云的处理采用了相同技术。此外, TOMS-N7 和 TOMS-EP 的臭氧总量存在一个系统性的误差, 即 TOMS-N7 要明显高于 Dobson 的测值, 而 EP 则是明显低于地基的测量。两颗卫星的臭氧总量的系统误差在香河约为 2%, 而在昆明则为 3%~4%。

与图 3 相比, 在香河、龙凤山 TOMS-EP 臭氧总量相对误差随云量从 0~100% 的变化基本上没有明显的上升趋势特点, 但整个相对误差随着云量的变化呈现“U”型分布, 即在云量的低端 (30% 以下) 或高端 (70% 以上) 时相对误差变化的幅度较大。昆明 TOMS 臭氧总量相对误差上升趋势较明显, 云量从 0 上升到 90% 以上时, TOMS-EP 和 TOMS-N7 的臭氧总量相对误差分别有 3% 和 2% 的变化。对于瓦里关站点, 当云量大于 30% 后, TOMS-EP 臭氧总量的相对误差随云量呈上升趋势且幅度接近 4%。由此可见, TOMS 臭氧总量精度对地基观测云量变化的敏感性可能具有一定的区域性特点: 在图 5 中表现出来的是香河和龙凤山比较接近, 两者都处于中纬度、臭氧高值区, 而昆明与瓦里关又比较类似, 两者均处在纬度较低、臭氧总

量较低的高原地区。

图 6 给出在给定的臭氧总量条件下 GOME 臭氧总量相对误差随地面云量变化, 从中可以看出, GOME 臭氧总量相对误差随云量变化没有显著趋势, 在香河、昆明、瓦里关、龙凤山的误差分别被控制在  $-1.5\% \sim 0$ 、 $-3\% \sim -1\%$ 、 $1\% \sim 3\%$ 、 $-3\% \sim 3\%$ 。GOME 臭氧总量相对误差在龙凤山出现较大幅度变化的原因还不是很清楚, 但是 GOME 臭氧总量相对精度在龙凤山、瓦里关均低于香河、昆明。

### 3.3 GOME 臭氧总量相对误差对 FRESCO 云量、云顶高变化敏感性

GOME 卫星提供的 FRESCO 云量和云高的信息, 为检验 GOME 臭氧总量精度与星基遥测云量和云高的关系提供了依据。图 7 给出了 GOME 卫星臭氧总量的相对误差与 FRESCO 云量 (图 7a) 以及云高 (图 7b) 的关系。从图 7a 可以看出: 当 FRESCO 云量在 40% 以下时, GOME 臭氧总量相对误差基本上没有特别明显的变化, 仅在瓦里关, 当云量在 10%~20% 之间变化时, 误差有 1% 左右幅度的下降。当 FRESCO 云量在 40% 以上变化时, 臭氧总量的相对误差随着云量的上升仅有 1% 左右变化, 这与图 3 展示的 GOME 臭氧总量相对误差随着地面观测云量的增加有整体上升趋势是不完全一样的。造成这种差异很可能还与 FRESCO 云量与地面观测云量之间时、空不完全一致有关。刘洪利等<sup>[18]</sup>曾就地面观测云量与 ISCCP 的云量比较, 指出这两者在我国还存在一定的差异, 这种差

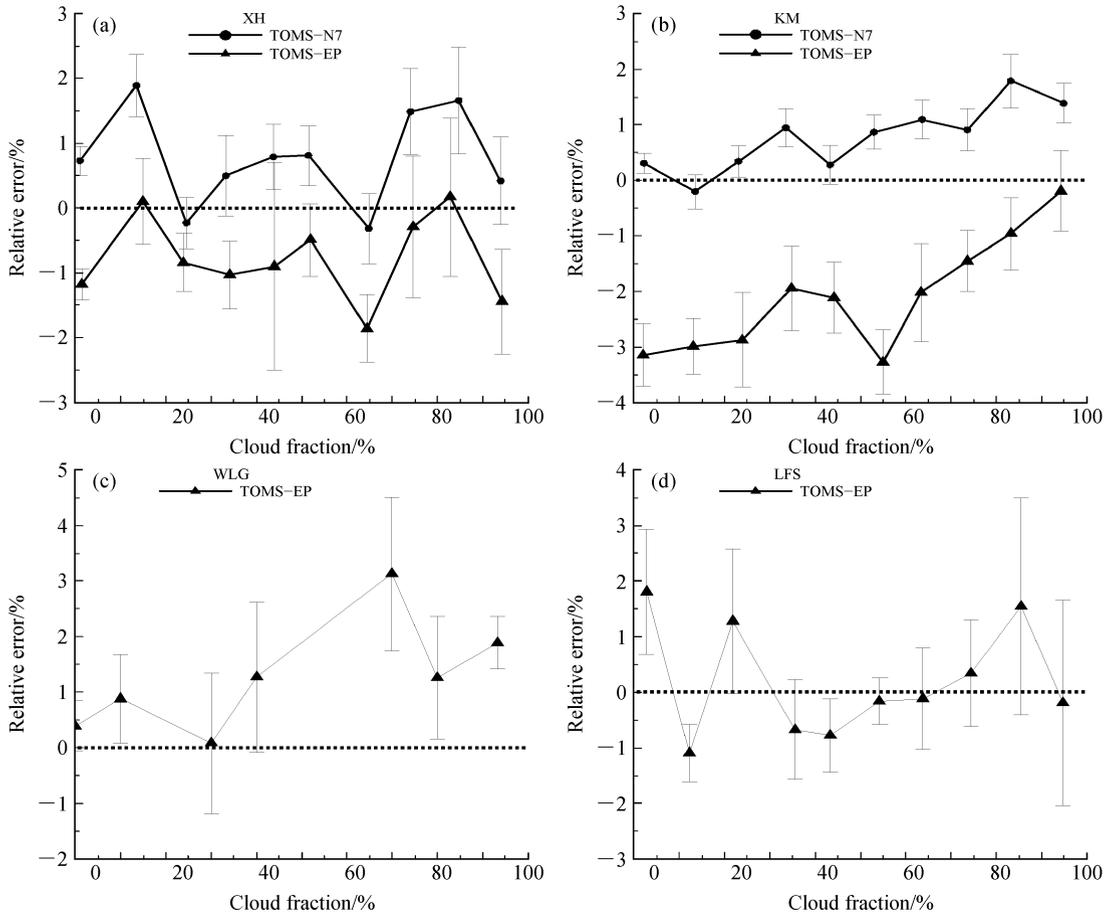


图 5 在给定臭氧总量的情况下 TMS 臭氧总量的相对误差 (含标准偏差) 对地面观测日平均云量变化关系: (a) 香河; (b) 昆明; (c) 瓦里关; (d) 龙凤山

Fig. 5 For a given total ozone, the averages of total ozone relative differences (with  $\pm 1$  standard deviation) between TMS and ground-based observations as a function of ground-scene daily mean cloud fraction (in 10% bins): (a) XH; (b) KM; (c) WLG; (d) LFS. Each point in the function curve represents at least 20 matchups

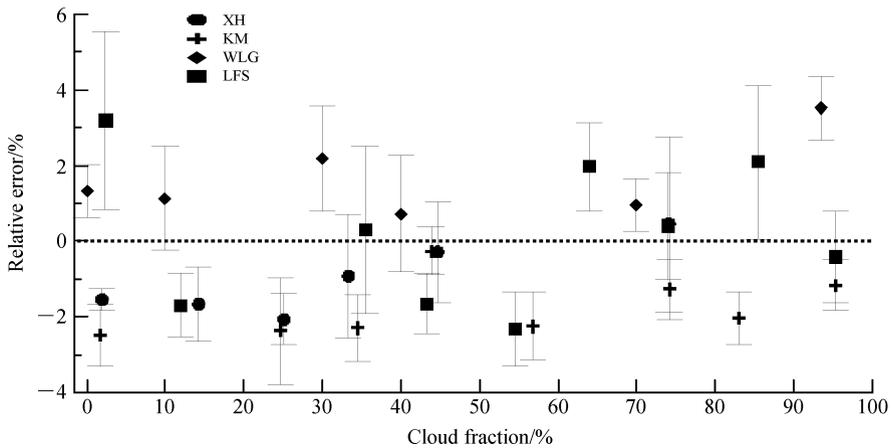


图 6 给定臭氧总量的情况下 GOME 卫星臭氧总量的相对误差 (含标准偏差) 与地面观测日平均云量变化之间的关系

Fig. 6 For a given total ozone, the averages of total ozone relative differences (with  $\pm 1$  standard deviation) between GOME and ground-based observations as a function of ground-scene daily mean cloud fraction (in 10% bins) at XH, KM, WLG and LFS

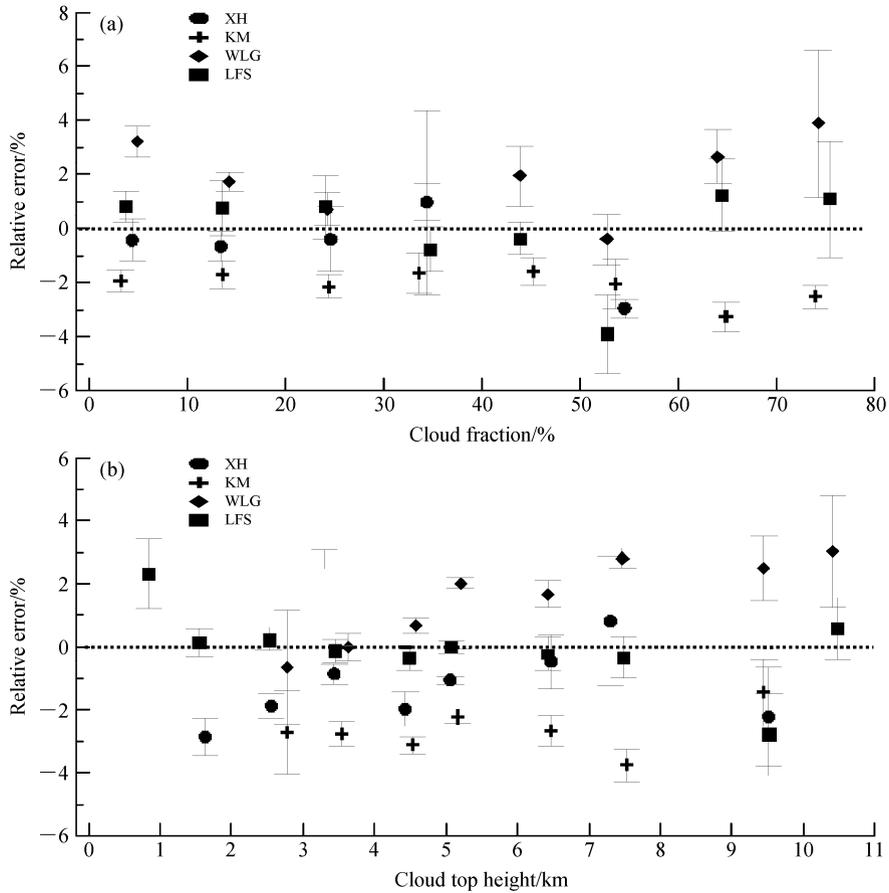


图7 GOME 卫星臭氧总量的相对误差 (含标准偏差) 与 FRESKO 观测日平均云量 (a) 以及云顶高度 (b) 之间的关系

Fig. 7 Averages of total ozone relative differences (with  $\pm 1$  standard deviation) between GOME and ground-based observations as functions of (a) FRESKO daily mean cloud fraction (in 10% bins) and (b) FRESKO cloud top height (1.0 km bins) at XH, KM, WLG and LFS. Each point in the function curve represents at least 20 matchups

异可能导致两者间关系的不同。但图 7a 从另一个侧面说明了因云量变化对 GOME 臭氧总量精度的影响已在卫星的反演算法中得到很好的控制, 因为反演 GOME 臭氧总量时对云量的处理是依据 FRESKO 云量, 而不是地面观测的云量。

从图 7b 可以看出, 随着云顶高度的增加, 臭氧总量相对误差上升趋势在香河、瓦里关两个站点比较明显, 变化幅度分别在  $-3\% \sim 1\%$ 、 $1\% \sim 3\%$ 。昆明和龙凤山站点卫星臭氧总量相对误差变化比较稳定, 仅当云顶在 8、9 km 时才出现明显的上升, 在这种情况下, 往往是高空存在卷云。可见, 随着云顶高度的增加, GOME 臭氧总量也有偏高的趋势。随着 FRESKO 云量和云顶高度的增加, GOME 臭氧总量的相对精度明显下降, 说明云量的增加或云顶高度的上升总体给予卫星反演臭氧总量精度的贡献是明显的。但总体来看, 由 FRESKO

云顶高度的变化引起的 GOME 卫星臭氧相对误差在反演计算过程中也被控制得比较成功。

GOME 臭氧总量相对误差分布是否与臭氧总量本身有关系? 为此, 图 8 给出了香河、昆明、瓦里关和龙凤山四个站点的地基臭氧总量与 FRESKO 云量的关系。显然, 臭氧总量与 FRESKO 云量之间的关系也不是很明显, 这与图 4 是不同的, 这再次表明在反演 GOME 臭氧总量过程中对因云量变化所引起的误差已被很好地控制, 同时, 也反映了地面云量与基于卫星遥感的云量有明显区别。此外, 图 8 也揭示了这样的事实: (1) 香河、龙凤山这样典型的中纬度、高臭氧总量地区, 臭氧总量变化与卫星遥测云量有着共同的变化特征: 即当云量由 0 上升到 30% (香河) 或 40% (龙凤山) 时臭氧总量是上升的, 而当云量高于上述值时, 臭氧总量则是下降的。这表明当香河、龙凤山地区云量在

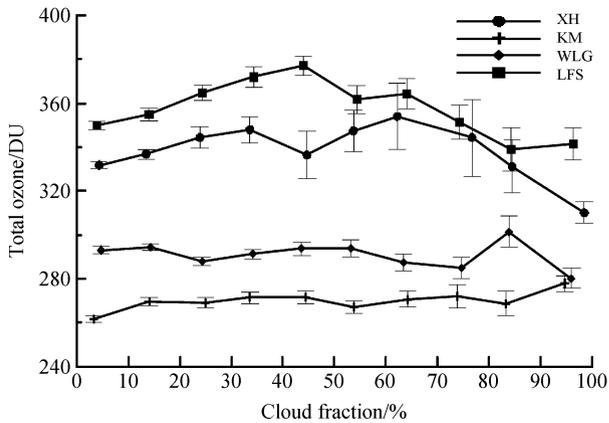


图8 臭氧总量与FRESCO观测日平均云量变化长期观测结果的统计关系(每个统计样本数至少20以上)

Fig. 8 Average of ground-based total ozone (with  $\pm 1$  standard deviation) as a function of the FRESCO daily mean cloud fraction (in 10% bins) at XH, KM, WLG and LFS (each point in the function curve represents at least 20 matchups)

30%或40%以下变化时,可能是来自高纬度地区的气流向低纬度地区输送占主导地位,导致臭氧总量的上升,而当云量高于50%以后,则是来自低纬度地区的暖湿气流占主导地位,导致臭氧总量的下降。(2)在昆明、瓦里关高原地区,臭氧总量与云量的关系不是很明显,尤其昆明与图4是不一样的,但图8臭氧总量与卫星观测云量之间的关系,再次说明臭氧总量与云量之间的关系具有区域性的特点。

### 3.4 TOMS 臭氧总量相对误差对云顶有效反射率变化的敏感性

TOMS-N7和TOMS-EP臭氧总量的时间序列均比较长。在TOMS提供的公开产品中,以卫星遥测的有效反射率间接地反映了云量的分布,并且成为判断卫星臭氧数据质量的依据之一<sup>[5]</sup>。当有效反射率高于80%时,该点的臭氧总量数据即被舍弃。图9给出香河、昆明、瓦里关和龙凤山TOMS臭氧总量相对误差与TOMS遥测的云顶有效反射率变化之间的关系,从图中可以看出,当有效反射率在60%以下时,TOMS-EP的相对误差均在1%以内,而其他的三个地方,TOMS-EP的相对误差是随着反射率的增加而趋于增大,且总体上有2%的上升幅度,也就是说,随着反射率的增加(或理解为有效云量的增加),TOMS-EP的臭氧总量相对误差被增大了2%左右。TOMS-N7臭氧总量的

相对误差随着有效反射率的变化与TOMS-EP的表现趋势也是一样的,这说明TOMS-N7和TOMS-EP存在一个系统性2%~3%左右的差别。显然,随着云量增加,TOMS-N7或TOMS-EP臭氧总量的相对精度均已下降(标准偏差在上升)。

## 4 讨论

通过卫星观测反演的臭氧总量精度受多种因素制约,而云仅是其中之一。本文是在假设其他因素(如臭氧、温度垂直分布廓线的初始值、太阳天顶角、气溶胶等)对卫星臭氧总量误差贡献不变的前提下,试图单独检验卫星臭氧总量相对误差与云量、云顶高度变化的关系,以了解卫星臭氧总量精度对云量或云顶高度变化的敏感性。在考虑臭氧总量和地面云量之间因天气过程或季节变化可能存在的固有关系外,本文分析注意到卫星臭氧总量误差随云量或云高的变化呈现整体性的增大趋势特点。

理论上,云的存在导致紫外后向散射的增强,应使得反演的臭氧总量偏低(后向紫外散射增强等效于臭氧吸收的减弱、臭氧浓度的降低),卫星臭氧总量相应的误差应呈现降低的趋势,然而本文通过长期观测数据比对分析,注意到云量增加使得总的卫星臭氧总量的相对误差扩大了。显然,由于平流层臭氧浓度相对比较稳定,那么相对误差的扩大意味着来自云内和云之间的臭氧、云底以下的臭氧浓度均在反演计算中随着云量增大而被高估了。

来自云顶高度以下的对流层的“虚柱臭氧”对卫星臭氧总量误差贡献存在高估的可能。根据臭氧探空试验<sup>[19]</sup>,注意到当有高云或者云量很大的情况下,往往是对流活动加强、贫臭氧气团占主导、对流层云底以下的臭氧浓度以及垂直分布很低,甚至在个别高度出现零的现象,远低于气候平均状态下的对流层臭氧浓度垂直分布。云团内由于暖湿气流的主导,臭氧本身很可能通过与 $H_2O$ 的反应被消耗掉,也呈现实际的低浓度的特点。但卫星在反演计算中(无论是TOMSV8.0或是TOGOMI)仍以气候平均的臭氧浓度分布状况来估算云底以及云内的臭氧柱浓度<sup>[12]</sup>,这样会在很大程度上给卫星臭氧总量贡献正误差。

在以地面观测结果为标准时,Dobson/Brewer仪器的观测也存在1%左右的相对误差<sup>[20]</sup>。对于手动观测的Dobson光谱仪来说,因为是通过观测员

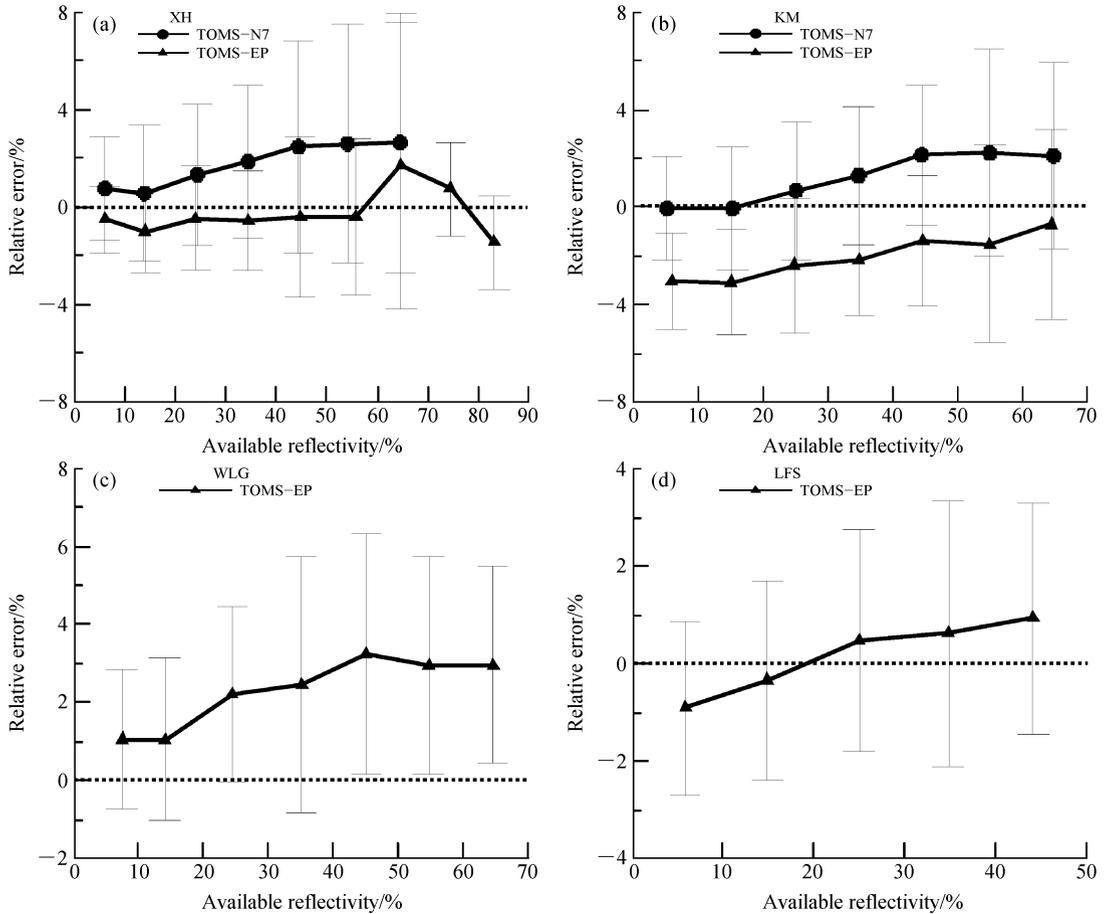


图9 TOMS臭氧总量的相对误差与TOMS有效反射率之间的关系:(a)香河;(b)昆明;(c)瓦里关;(d)龙凤山。TOMS有效反射率以10%为单位递增;每个统计样本数至少20以上

Fig. 9 The averages of relative differences (with  $\pm 1$  standard deviation) of total ozone between TOMS and ground-based observations as a function of TOMS available reflectivity (in 10% bins): (a) XH; (b) KM; (c) WLK; (d) LFS. Each point in the function curve represents at least 20 matchups

目测,可以排除云的影响。但对于自动进行太阳跟踪观测的 Brewer 臭氧光谱仪来说,情形可能略有不同。Brewer 臭氧光谱仪对云的处理采用两个步骤:(1)在仪器的设计原理上,采用类似差分吸收的原理,尽量消除云和气溶胶的影响(这一点与 Dobson 仪器的设计原理相似);(2)仪器每获取一次跟踪太阳臭氧总量的观测,由5次独立的直接跟踪太阳观测在3 min内完成,以这5次测量结果的标准偏差大于2.5 DU时被认为是云的干扰造成,而将该次臭氧总量剔除。但是,第2步经验性处理方法还存在一定的不足,使得实际测量结果有时出现10~15 DU偏高的现象<sup>[21]</sup>。另外,这一经验性的处理方法并不能完全有效地排除有薄云情况下 Brewer 光谱仪获取臭氧总量的值。根据标准偏差

大于2.5 DU这一经验性的阈值,笔者选取了南极中山站 Brewer 仪器直射太阳光观测臭氧总量的原始数据,然后计算了气溶胶的光学厚度(波长在320.0 nm),注意到在有些情况下中山站的气溶胶光学厚度出现2.0以上,造成这种不符合实际高值的原因主要是来自薄云的影响。)

## 5 结论

本文通过香河、昆明、瓦里关和龙凤山四个站点的地基与卫星长期观测臭氧总量的比对分析,在分析臭氧总量长期变化基础上,检验地面观测的云量、GOME-FRESCO云量、云顶高度以及TOMS有效反射率对卫星臭氧总量误差的影响,得出了以下结论:

(1) 1979年以来香河、昆明、瓦里关和龙凤山四个地点的臭氧总量均有明显的下降趋势,卫星与地基观测的臭氧总量长期趋势特征一致,但是卫星与地基各自观测的臭氧总量还是存在显著的差别。TOMS-N7臭氧总量明显高于香河、昆明地基测值;TOMS-EP或GOME的臭氧总量则低于香河、昆明的地基测值,而瓦里关和龙凤山在1999~2001年间要高于Brewer的测值。

(2) 云(云量或云顶高度)的增加扩大了卫星臭氧总量误差,使得数据精度降低。以地面观测云量为判断依据,云的出现使香河、昆明、瓦里关、龙凤山四个地点TOMS臭氧总量的平均绝对精度分别下降了1.7、1.7、1.4、1.9 DU,而GOME臭氧总量精度相应下降了4.8、0.4、2.0、6.2 DU。

(3) 随着地面云量增加,TOMS、GOME臭氧总量相对误差均有一定幅度的变化(1%~3%之间)。TOMS相对误差呈系统性上升趋势(昆明和瓦里关高原观测点尤其明显)。TOMS臭氧总量的相对误差随地面云量变化呈现区域性特点:香河与龙凤山代表中纬度臭氧总量高值地区,相对误差随云量变化呈现类似“U”型分布;而昆明、瓦里关代表高原、臭氧总量低值区域,相对误差呈现总体上升趋势(幅度在3%以内);GOME的相对误差没有明显的区域性特点,相对误差变化幅度在3%以内。

(4) GOME臭氧总量的误差对GOME-FRESCO云量变化的依赖性比较低,但对GOME-FRESCO云顶高度变化的灵敏度较为明显:香河、瓦里关上空的GOME臭氧总量误差随云顶高度的上升均有明显上升趋势,相对误差有3%左右的变化。

(5) 随着有效反射率的增加,TOMS臭氧总量相对误差有增大趋势,且增大幅度超过2%。TOMS-N7的臭氧总比TOMS-EP约高2.0%~3.0%。

**致谢** 2003年以前香河和昆明Dobson日平均臭氧总量数据由中国科学院大气物理研究所卞建春博士提供,之后的数据从WOUDC下载。TOMS臭氧总量数据从jwocky.gsfc.nasa.gov下载;GOME臭氧总量(包括FRESCO云量和云高)由Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) Vander博士提供;四个地点的日观测云量的平均数据由中国气象局气象信息中心提供。

## 参考文献 (References)

[1] Thompson A M, McNamara D P, Pickering K E. et al.

Effect of marine stratocumulus on TOMS ozone. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 23051~23057

[2] McPeters R D, Labow G J. An assessment of the accuracy of 14.5 years of Nimbus 7 TOMS Version 7 ozone data by comparison with the Dobson network. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**: 3695~3698

[3] Newchurch M J, Liu X, Kim J H, et al. On the accuracy of Total Ozone Mapping Spectrometer retrievals over tropical cloudy regions. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 32325~32326

[4] Liu Xiong, Newchurch M J, Kim J H. Occurrence of ozone anomalies over cloudy areas in TOMS version-7 level-2 data. *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, **3**: 1113~1129

[5] Bhartia P K, Wellemeyer C. TOMS version 8 Algorithm Theoretical Basis Document. <http://toms.gsfc.nasa.gov>. 2004

[6] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, et al. The Global Monitoring Experiment (GOME): Mission concept and first scientific results. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 151~175

[7] 魏鼎文, 赵延亮, 秦芳, 等. 中国北京和昆明地区大气臭氧层异常变化. 科学通报, 1994, **39** (16): 1509~1511  
Wei Dingwen, Zhao Yanliang, Qin Fang, et al. Abnormal variation of atmospheric ozone in Beijing and Kunming. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1994, **39** (16): 1509~1511

[8] 杨理权, 邱金桓, 赵延亮. 火山气溶胶对北京地区臭氧总量变化趋势的影响. 大气科学, 1998, **22** (5): 686~692  
Yang Liquan, Qiu Jinhuan, Zhao Yanliang. Effects of volcanic aerosol on ozone change trends over Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1998, **22** (5): 686~692

[9] Ziemke J R, Chandra S, Bhartia P K. Two new methods for deriving tropospheric column ozone from TOMS measurements: Assimilated UARS MLS/HALOE and convective-cloud differential techniques. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 22115~22127

[10] Newchurch M J, Sun D, Kim J H. et al. Tropical tropospheric ozone derived using Clear-Cloudy Pairs (CCP) of TOMS measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 2003, **3**: 683~695

[11] Bian Jianchun, Chen Hongbin, Zhang Zhongbo, et al. Unusual discrepancy between TOMS and ground-based measurements of the total ozone in 2002-2003. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50** (6): 606~608

[12] Valks P, Veeffkind J P, de Haan J F, et al. TOGOMI Algorithm Theoretical Baseline Document. TOGOMI/KNMI/ATBD/001, Issue 1.2, 01/11/2003

[13] Koелеmeijer R B A, Stammes P, Hovenier J W, et al. A fast method for retrieval of cloud parameters using oxygen A band measurements from Global Ozone Monitoring Experiment.

- J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 3475~3490
- [14] Smit H G J, Wolfgang S. JOSIE-1998 performance of the ECC ozone sondes of SPC-6A and ENSCI-Z type. Global Atmosphere Watch Report Series. NO. 157. WMO/TD-No. 1218. Geneva; WMO, 2004
- [15] Eskridge R E, Ku J Y, Rao S T, et al. Separating different scales of motion in time series of meteorological variables. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78** (7): 1473~1483
- [16] Meghan L M, Rao S T, Zurbenko I G. Evaluating the effectiveness of ozone management effort in the presence of meteorological variability. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 1998, **48**: 1201~1215
- [17] Casale G R, Meloni D, Miano S, et al. Solar UV-B irradiance and total ozone in Italy: Fluctuations and trends. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (D4): 4895~4901
- [18] 刘洪利, 朱文琴, 宜树华, 等. 中国地区云的气候特征分析. *气象学报*, 2003, **61** (4): 467~474  
Liu Hongli, Zhu Wenqin, Yi Shuhua, et al. Climatic analysis of the cloud over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (4): 467~474
- [19] 郑向东, 周秀骥, 秦瑜, 等. 西宁夏季对流层臭氧垂直分布变化与气象要素的关系. *气象学报*, 2002, **60** (1): 47~52  
Zheng Xiangdong, Zhou Xiuji, Qin Yu, et al. Variations in vertical distributions of tropospheric ozone and relationship with meteorological elements over Xining in summer season. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (1): 47~52
- [20] Staehelin J, Kerr J, Evans R, et al. Comparison of total ozone measurements of Dobson and Brewer spectrophotometers and recommended transfer functions. Global Atmosphere Watch Report Series, NO. 149, WMO/TD-No. 1214. Geneva; WMO, 2003
- [21] McPeters R D. Satellite calibration monitoring using a Brewer. 7th Brewer Users Group Meeting, Toronto, Canada, Sept. 16, 2002 ([http://www.woudc.org/bdms/meetings/BRWKSH2002/brwksh2002\\_workshop\\_e.html](http://www.woudc.org/bdms/meetings/BRWKSH2002/brwksh2002_workshop_e.html). 2002)