

江芳,王维和,王咏梅等. FY-3 气象卫星紫外臭氧总量探测仪辐亮度在轨定标与反演结果分析. 地球物理学报, 2012, 55(3): 760-767, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 005.

Jiang F, Wang W H, Wang Y M, et al. Calibration in-orbit and retrieval result study of FY-3 Total Ozone Unit (TOU). *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3):760-767, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 005.

FY-3 气象卫星紫外臭氧总量探测仪辐亮度 在轨定标与反演结果分析

江 芳¹,王维和²,王咏梅¹,王英鉴¹

1 中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100190

2 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081

摘 要 FY-3 气象卫星上搭载的紫外臭氧总量探测仪 TOU 是我国自主开发研制的首台用于全球臭氧总量定量测量的探测仪,自发射以来已成功在轨运行近两年. 由于 TOU 发射前辐亮度定标存在偏差,为了得到高精度的产品,TOU 必须进行在轨定标. 本文介绍了基于辐射传输模式计算对 TOU 辐亮度进行在轨道定标的方法,定标过程中用于模拟辐亮度计算的臭氧总量由与 TOU 观测时刻相近的国外臭氧总量探测仪器 MetOp/GOME-2 提供. 文章将在轨定标后 TOU 的反演结果与 AURA/OMI 以及地基的产品进行比较,结果表明,用辐射传输模式对 TOU 辐亮度进行在轨定标的方法是可行的,反演结果能够真实地反映臭氧的时空分布特性,在全球部分地基观测站所处的位置上对 TOU, OMI 以及地基的臭氧总量进行比较的结果表明,TOU 与 OMI 的相对偏差均方根约为 2.52%,TOU 与地基以及 OMI 与地基观测结果之间的相对偏差均方根分别为 4.45%和 3.89%.

关键词 臭氧总量探测仪,臭氧总量,风云三号,反演

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 005

中图分类号 P412

收稿日期 2011-06-28,2011-12-13 收修定稿

Calibration in-orbit and retrieval result study of FY-3 Total Ozone Unit (TOU)

JIANG Fang¹, WANG Wei-He², WANG Yong-Mei¹, WANG Ying-Jian¹

1 Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites,

China Meteorological Administration (LRCVES/CMA), Beijing 100081, China

Abstract Ultraviolet Total Ozone Unit (TOU) is one of the main payloads on FY-3 satellite and the first instrument for daily global coverage of total ozone monitoring in China. TOU has been operating in-orbit about two years. Because pre-launch calibration has serious error in high ranges of radiance, an in-orbit calibration method based on radiative transfer model calculation was introduced in the paper, the total ozone column used to calculate the simulation radiance was produced from MetOp/GOME-2. The retrieval results were compared with AURA/OMI global ozone products and ground-based ozone measurement data, the results show that the calibration method is feasible and the spatial and temporal distribution characteristics are consistent with OMI and GOME-2 products. The quantitative comparisons with ground-based measurements and AURA/OMI ozone product were made over 74 stations, the TOU total ozone retrieval has a 2.52% RMS relative error compared with AURA/OMI ozone product. The TOU total ozone

retrieval has a 4.45% RMS relative error compared with ground-based ozone product and the AURA/OMI total ozone retrieval has a 3.89% RMS relative error compared with ground-based ozone product.

Keywords Total Ozone Unit, Total column ozone, FY-3 satellite, Retrieval

1 引言

对大气臭氧的监测一直是大气和环境科学的重要内容之一,利用紫外后向散射探测大气臭氧总量是目前卫星探测全球臭氧分布的主要方式.自 1979 年由 Nimbus-7 / TOMS 探测仪开始,利用紫外后向散射测量臭氧总量已连续获得了近 30 年的全球大气臭氧总量资料^[1-6].2008 年 5 月 27 日我国成功发射了第二代极地轨道气象卫星风云三号,其上搭载的 TOU 是我国自主开发研制的首台用于臭氧总量全球定量测量的紫外后向散射探测仪^[7].TOU 的成功发射和运行有望从根本上改变我国大气臭氧探测和研究的现状.

星载紫外臭氧总量探测仪在轨运行期间探测太阳紫外光谱辐照度和太阳紫外后向散射光谱辐亮度,并通过太阳后向散射光谱辐亮度和太阳光谱辐照度的比值来反演大气中的臭氧含量^[8].仪器在发射前需要地面辐射定标来建立进入仪器的辐射量与输出电信号间的定量关系,辐射定标分为辐照度响应定标和辐亮度响应定标.由于忽略了光电倍增管在强信号时输出的电信号与光信号强度的非线性影响,因此 TOU 在发射前的实验室辐亮度定标存在系统偏差,为了得到高精度产品,需要通过在轨交叉定标生成新的定标系数对辐亮度进行修正.国外星上仪器的交叉定标通常采用先前发射的卫星上同类仪器的探测值与新发射卫星上仪器探测值直接作比较进行修正的办法,但是直接比较辐射值需要的条件较为苛刻,探测同一像元时需要太阳天顶角、卫星天顶角以及二者之间的相对方位角一致,所以满足条件的点较少^[9].国外也提出过利用辐射传输模式对仪器探测值定标的方法,并在 ERS-2/GOME 最初的数据认证中用过.具体方法是将 SBUV-2 探测的臭氧代入模式,计算观测条件相同时的辐射亮度值,然后对观测值进行修正^[10].

鉴于 TOU 的实际情况,本文采用辐射传输模式计算对 TOU 辐亮度进行在轨交叉定标,利用 GOME-2 观测的臭氧总量作为辐射传输模式的输入参数,定标后的反演结果与 AURA/OMI 以及地

基的资料比较表明,反演结果能够真实地反映臭氧的时空分布特性,TOU 分别与 OMI 和地基的观测结果比较,相对偏差均方根平均值分别约为 2.52% 和 4.45%,反演结果证明了在轨定标方法的可行性.

2 紫外臭氧总量探测仪(TOU)与反演算法简介

TOU 是搭载于极轨卫星上用于测量整层大气臭氧总量的分光辐射探测仪,其分光系统采用固定光栅、狭缝阵列式 Ebert-Fastie 单光栅光谱仪系统,探测器为光电倍增管^[7].仪器的工作模式分别为用以完成太阳后向散射强度测量的对地扫描模式、用以太阳辐照度测量的辐射定标模式和用以波长检测的波长检测模式.

TOU 反演算法与 TOMS V7 反演算法基本相同,都是基于波长对算法,即根据臭氧吸收有较大差异、而气溶胶散射和分子散射效应大致相同的两个波长的后向散射强度差与臭氧总量存在的密切关系来推算臭氧总量.在 TOMS V7 算法的基础上,根据 TOU 自身特点对不同纬度探测通道对的选取做了调整^[11].

3 辐亮度在轨定标方法

紫外后向散射强度即辐亮度值 I_m 可以由(1)式计算得到:

$$I_m(\lambda, \theta_0, \varphi_0, \Omega, \zeta, R, p_0) = I_0(\lambda, \theta_0, \varphi_0, \Omega, \zeta, R = 0.0, p_0) + R \cdot T(\lambda, \theta_0, \varphi_0, \Omega, \zeta, p_0) / (1 - RS_b(\lambda, \Omega, \zeta, p_0)), \quad (1)$$

其中, T 为到达地面的总辐射量, S_b 为下垫面将大气辐射反射到空间的比例, λ 表示波长, θ_0 、 φ_0 分别表示太阳天顶角和卫星与太阳之间相对方位角度, Ω 为大气臭氧总量, ζ 为大气臭氧廓线, R 为下垫面有效反照率, p_0 为表面压力.除了 Ω 和 R , 其他参数都可以用与臭氧总量探测仪无关的其他方法得到.

TOU 在轨定标的基本过程是利用辐射传输模式计算的模拟辐亮度值与探测值进行统计回归得到每个通道的定标系数,辐射传输计算所用的各像元

上的臭氧总量值来自通用的国外仪器产品,具体过程如下:

(i)通道 6 线性区辐亮度定标系数的确定

该波段的臭氧吸收非常微弱,探测值几乎与臭氧总量值无关,如果已知下垫面有效反照率就可以得到模拟辐亮度值. 由于 TOU 在高辐射区辐亮度存在饱和以及非线性问题,因此定标选取处于线性区的辐亮度值进行. 取太阳天顶角大于 0° 小于 70° 的太平洋地区,根据大量观测结果,海洋表面紫外反射率一般为 0.05,排除掉有云的高辐射像元以及可能受到太阳耀斑影响的像元(通常认为太阳耀斑角小于 30° 时容易受到太阳耀斑的影响),通过辐射传输模式计算出满足上述条件的各像元上通道 6 辐亮度的理论值,因此可以得到各个扫描方向上处于线性区通道 6 辐亮度探测值与理论值的比值,也就是通道 6 在线性区的在轨定标系数.

(ii)其他通道线性区辐亮度定标系数的确定

利用通道 6 修正后的辐亮度计算有效反射率,根据国外星上仪器提供的臭氧总量值计算通道 4 的辐亮度值,可以得到通道 4 线性区辐射订正系数,利用通道 6 或者通道 4 修正后的辐亮度值计算有效反射率,可以计算出通道 2 辐亮度,由于通道 2 整个动

态范围都处于定标的线性区,可以得到通道 2 整个动态范围的辐射订正系数,根据修正以后处于线性区的通道 6,通道 4,或者通道 2 的值可以估算整个动态范围的有效反射率,完成所有通道辐亮度探测值的订正.

(iii)整个动态范围内定标系数

每个通道的动态范围不同,在轨定标系数生成的原则是,从动态范围较大的通道推算动态范围较小通道位于线性区的定标系数,尽量用受臭氧总量影响较小的通道估算有效反射率. 因通道 6 计算有效反射率不受臭氧总量的影响,通道 4 受臭氧总量的影响也不是很大,通道 2 受臭氧总量影响很大,因此计算有效反射率时选取通道的优先级别是:在确立了通道 6 线性区定标系数以后,当观测值处在通道 6 的线性区时,用通道 6 计算有效反射率,当观测值处在通道 4 线性区时用通道 4 计算有效反射率,其余情况下用通道 2 线性区计算有效反射率. 最后根据有效反射率计算每个通道整个动态范围内的辐亮度,根据模拟计算结果和观测值,给出各个通道、各个扫描方向的辐亮度定标系数. 在计算有效反射率时去掉饱和像元.

利用观测时间与 TOU 相近的 GOME-2 臭氧

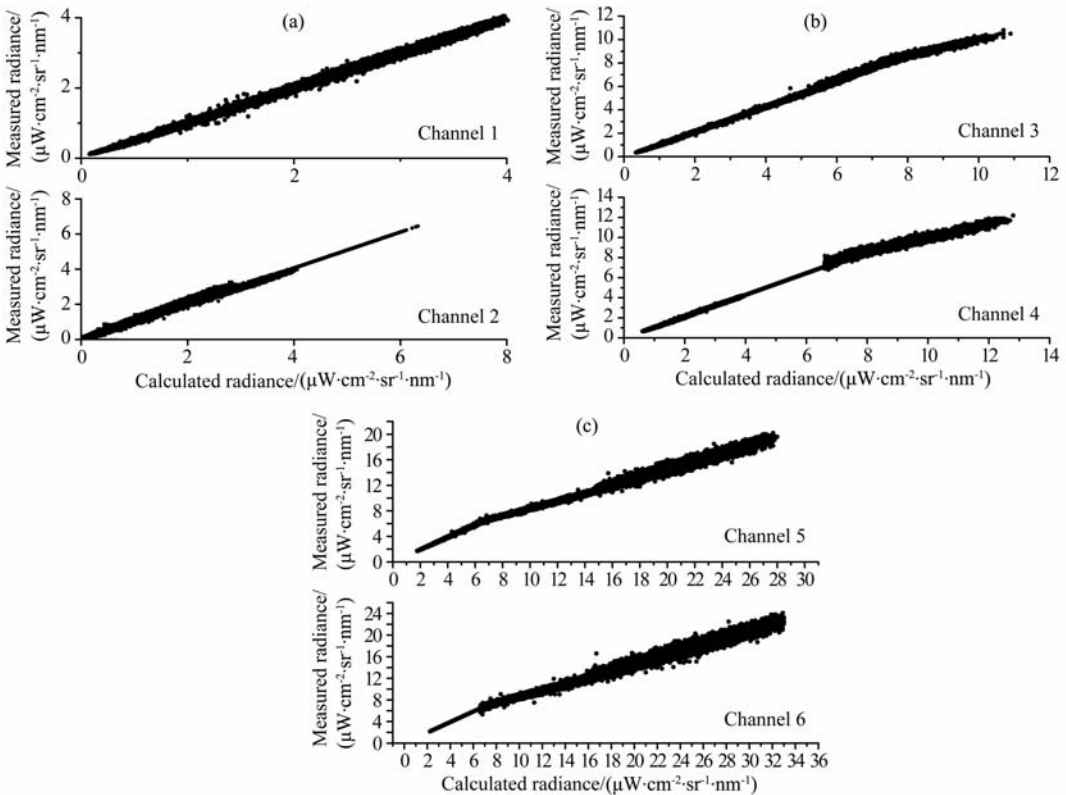


图 1 TOU 在轨定标结果

Fig. 1 The calibration result of TOU in-orbit

总量作为辐射传输计算的输入量,对 2009 年 1 月 1 日到 4 月 30 日期间的观测数据进行定标并得到定标系数,图 1 中横坐标表示用辐射传输计算的模拟计算值,即定标后的辐亮度值,纵坐标表示定标前的辐亮度探测值,由图可见,相对于辐亮度处于低信号区同线性度范围的 1、2、3 通道,处于两个不同线性度范围的 4、5、6 通道定标后的辐亮度在高信号区的动态范围明显增大。

4 反演结果的检验

利用上述方法对 TOU 发射两年的观测数据进行在轨道定标并进行全球臭氧总量反演实验,为了验证定标的正确性,搜集了同时期内国外臭氧总量探测仪与地基产品对 TOU 的反演结果进行验证。

图 2 为 TOU、GOME-2 以及 OMI 于 2009 年 5

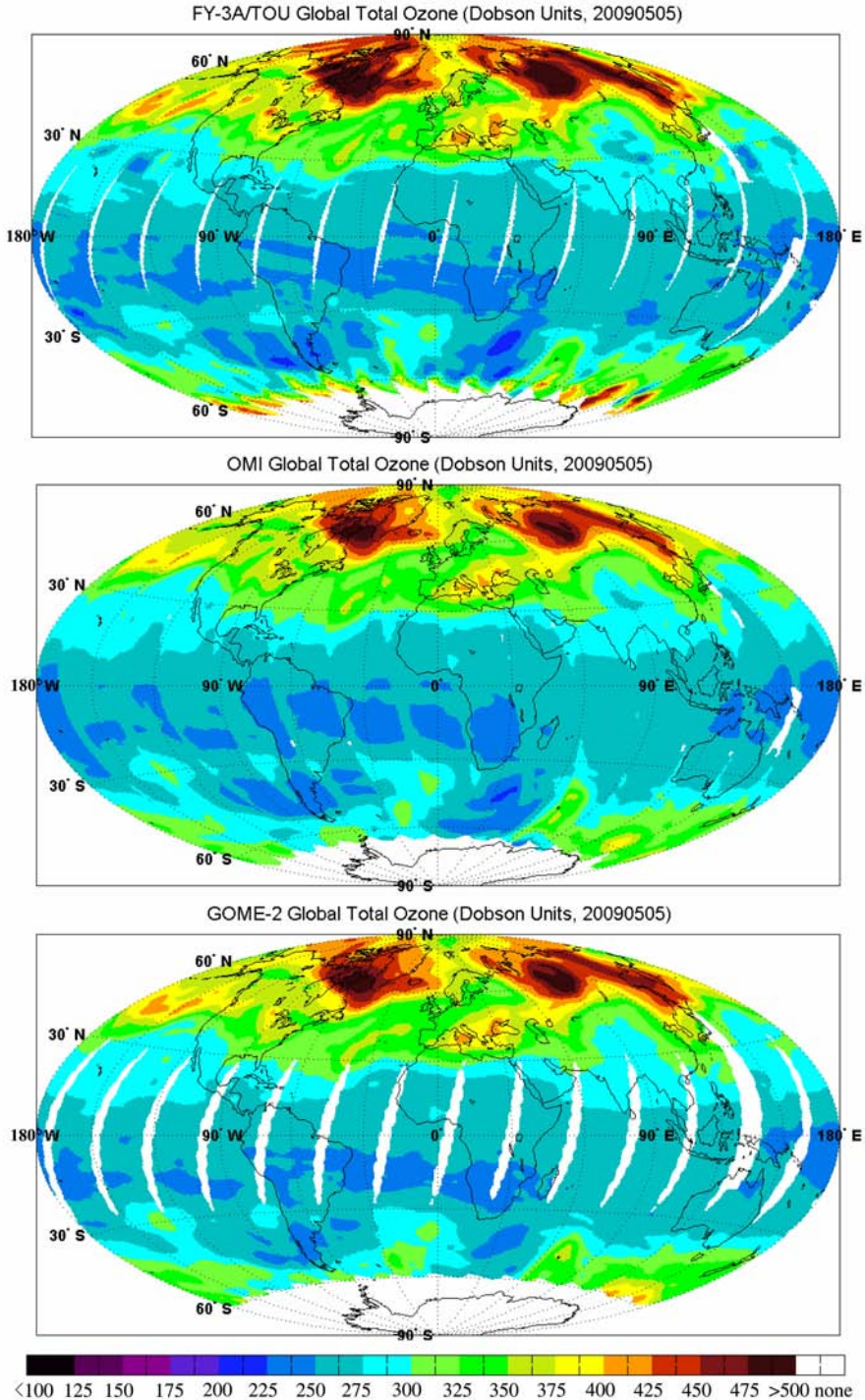


图 2 TOU、GOME-2、OMI 于 2009 年 5 月 5 日获得的全球臭氧总量分布
 Fig. 2 The global distribution of atmospheric ozone obtained by TOU, GOME-2, OMI on May 5, 2009

月 5 日获得的臭氧总量全球分布,由图可见,三个仪器的测量结果在空间分布上很接近,均很好地反映了臭氧的空间分布特征。

探测时间与 TOU 相差 4 个小时的 OMI 是目前世界上先进的臭氧总量探测仪器之一,为了更进一步地了解 TOU 的探测精度,需要将 TOU 的探测结果分别与 OMI 以及地基的探测结果进行比较。图 3—6 分别给出了北半球低、中、高纬度地区和南极圈附近 2009 年 1—4 月 TOU 与地基、OMI 与地基以及 TOU 与 OMI 探测结果的关系图。由图可见,三种探测方式中的任意两种探测结果在四个纬度带均呈现正相关性,且与地基探测结果比较,两个星上探测结果符合得要更好;总体而言,北半球中纬、高

纬地区三种探测结果的一致性要好于另外两个地区。如图 3 所示的低纬地区,两个卫星探测的结果符合得比较好,而地基探测与卫星探测的结果在某些点有较大偏差,这可能是因为该地区常出现热带对流云,从而使反演算法产生较大偏差^[12],但最终原因仍需要作进一步研究。另外,在图 6 所示的南极地区,即使是符合较好的两个星上探测结果的相关系数也仅为 0.89,低于其他几个地区,原因可能有两个:第一,南极地区臭氧含量较低,卫星辐射定标存在较大误差;第二,高纬地区臭氧变化速度要高于中低纬地区^[13],而 TOU 与 OMI 的探测时间相差约 4 h。三种探测方式中的两两结果比较的相关系数、线性拟合系数以及均方根误差见表 1。

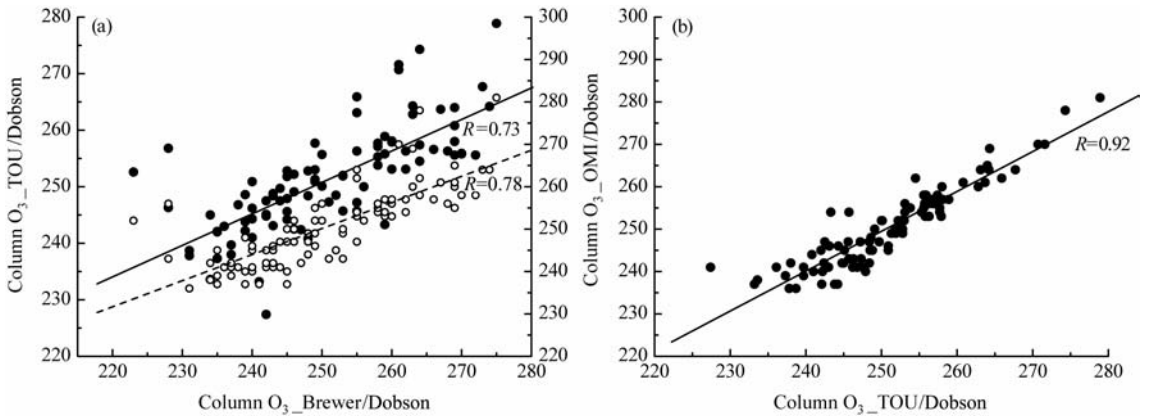


图 3 赤道地区(SINGAPORE 观测站,1.333°N,103.883°E)TOU、OMI 与地基三种探测方式中的两两探测结果关系图

图(a)中的实线对应图中的实心圆点,表示地基与 TOU 探测结果的线性拟合,
虚线对应图中的空心圆点,表示地基与 OMI 探测结果的线性拟合。

Fig. 3 Comparisons of total column ozone retrieved from TOU with OMI product and ground based measurements at equatorial region (SINGAPORE; 1.333°N,103.883°E)

In (a), the solid line corresponds to the solid dot, indicating linear fitting of Brewer and TOU; the dotted line corresponds to the hollow dot, indicating linear fitting of Brewer and OMI.

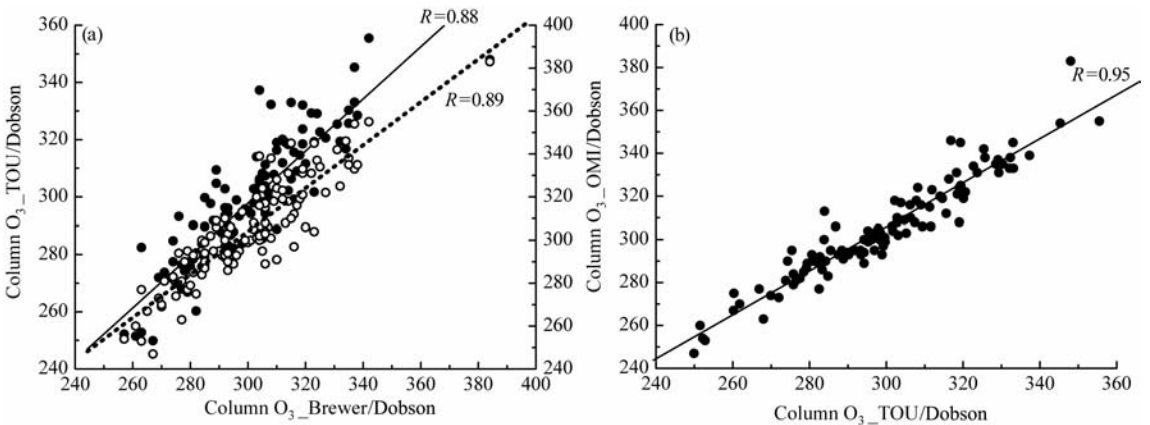


图 4 同图 3,但为北半球中纬地区(CAIRO 观测站,30.08°N, 31.283°E)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but at northern hemisphere mid-latitude (CAIRO; 30.08°N, 31.283°E)

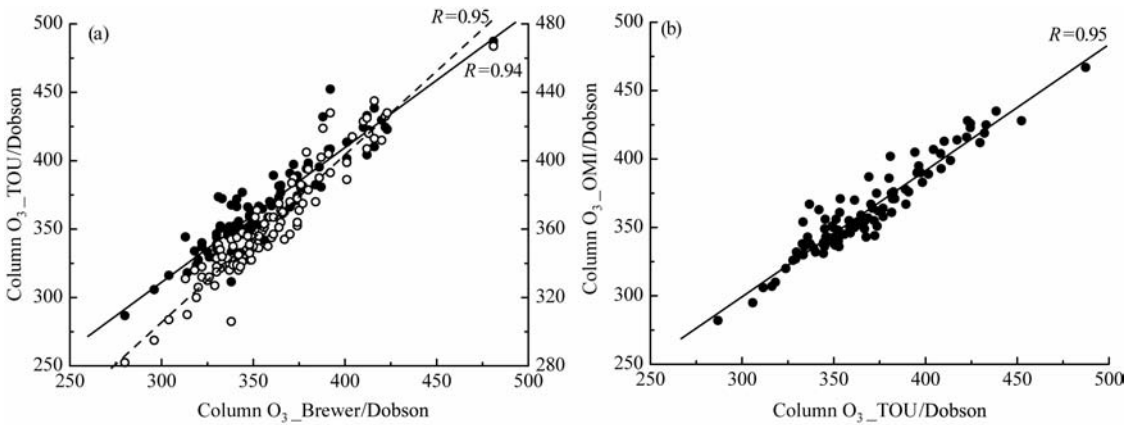


图 5 同图 3, 但为北半球高纬地区(UCCLE 观测站, 50.8°N, 4.35°E)

Fig. 5 Same as Fig. 3, but at northern hemisphere high-latitude (UCCLE: 50.8°N, 4.35°E)

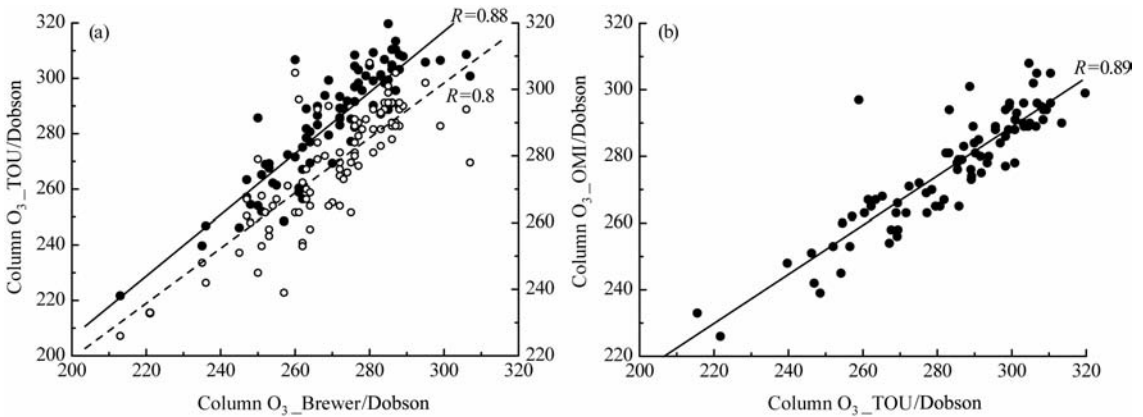


图 6 同图 3, 但为南极圈附近(MARAMBIO 观测站, 64.233°S, 56.623°W)

Fig. 6 Same as Fig. 3, but near the Antarctic circle (MARAMBIO: 64.233°S, 56.623°W)

表 1 两两探测结果的相关系数、线性拟合系数
以及均方根误差Table 1 The correlation coefficient, linear regression coefficient
and root mean square error of detection results

站点	拟合参数	线性拟合系数		均方根 误差 (%)	R
		A	B		
SINGAPORE	Brewer-TOU	111.48	0.56	3.5	0.73
SINGAPORE	Brewer-OMI	96.25	0.62	3.4	0.79
SINGAPORE	TOU-OMI	14.3	0.94	2.3	0.92
CAIRO	Brewer-TOU	22.62	0.92	3.3	0.88
CAIRO	Brewer-OMI	3.53	1.0	3.6	0.89
CAIRO	TOU-OMI	1.1	1.0	2.9	0.95
UCCLE	Brewer-TOU	16.39	0.98	4.3	0.93
UCCLE	Brewer-OMI	11.63	0.98	3.9	0.95
UCCLE	TOU-OMI	22.19	0.92	3.7	0.95
MARAMBIO	Brewer-TOU	-14.73	1.1	6.2	0.88
MARAMBIO	Brewer-OMI	53.96	0.83	4.7	0.8
MARAMBIO	TOU-OMI	67.8	0.74	4.1	0.89

图 7 给出了 2009 年 1—3 月 TOU, OMI 以及地基方式探测的臭氧总量相对偏差的平均值随纬度的分布, 在此基础上算得 TOU 与地基观测结果的全球平均相对偏差为 0.72%, OMI 与地基的全球平均相对偏差为 0.71%, TOU 与 OMI 的全球平均相对偏差为 -0.02%。根据计算可知, 相对地基探测, 卫星观测结果之间相对偏差较小, 全球绝大部分站点 TOU 与 OMI 的平均相对偏差在 4% 之内, 主要原因有两点, 第一是地基与卫星观测的时刻不一样, 地基取一天多次观测的平均值, 而卫星观测给出的是瞬时值, 第二是因为卫星观测是取像元内的臭氧总量平均值, 而地基只代表单点测量的结果。图 8 为三种探测方式在 3 个月内连续获得的臭氧总量相对偏差均方根的平均值随纬度的分布情况, 其中 TOU 与地基观测结果之间的相对偏差均方根平均值为 4.45%, OMI 与地基观测结果之间的相对偏差均方根平均值为 3.89%, TOU 与 OMI 之间的相对偏差均方根平均值为 2.50%。

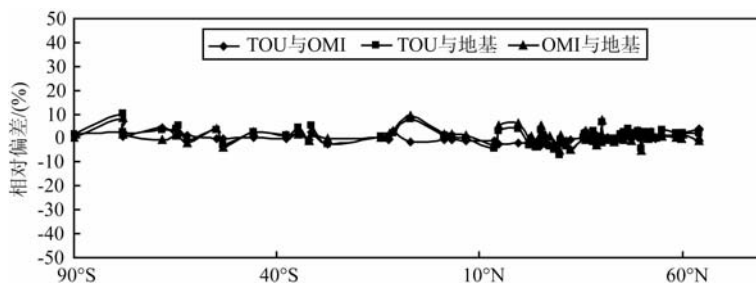


图7 TOU, OMI 以及地基方式探测的臭氧总量相对偏差的平均值随纬度的分布(测量时间 2009 年 1—3 月)

Fig. 7 Average relative deviation of total ozone inter-comparisons between TOU, OMI and ground data from January to March in 2009

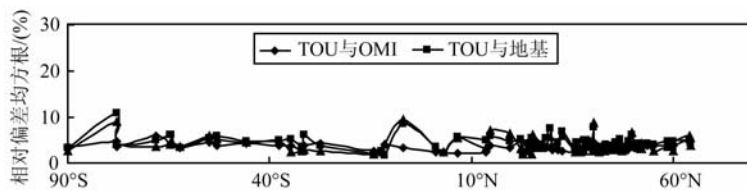


图8 TOU, OMI 以及地基方式探测的臭氧总量相对偏差均方根平均值随纬度的分布(测量时间 2009 年 1—3 月)

Fig. 8 RMS relative deviation of total ozone inter-comparisons between TOU, OMI and ground data from January to March in 2009

5 结 论

由于 FY-3/TOU 在发射前的实验室辐亮度定标存在系统偏差,本文介绍了利用辐射传输计算对 TOU 进行在轨定标的方法,并利用新的定标系数反演臭氧总量,将反演结果与地基以及卫星的探测结果进行了定量的比较,结果表明,TOU 与 OMI、TOU 与地基探测结果的相对偏差均方根分别为 2.52%、4.45%,定标后的反演精度证明了在轨定标方法的可行性。

参考文献(References)

[1] Heath D F, Krueger A J, Roeder H A, et al. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for NIMBUS G. *Opt. Eng.*, 1975, 14: 323-331.

[2] Jaross G, Krueger A J, Cebula R P, et al. Calibration and postlaunch performance of the Meteor 3/TOMS instrument. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(D2): 2985-2995.

[3] Krueger A J, Jaross G. TOMS/ADEOS instrument characterization. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1999, 37(3): 1543-1549.

[4] McPeters R, Bhartia P K, Krueger A J, et al. Earth Probe total ozone mapping spectrometer (TOMS) data products user's guide. NASA. TP-1998-206895.

[5] Levelt P F, van den Oord G H J, Dobber M R, et al. The ozone monitoring instrument. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, 44(5): 1093-1101.

[6] 江芳,刘振兴,王英鉴等. 云顶以下臭氧对 TOMS 反演臭氧总量的影响及反演方法的理论研究. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 364-369.

Jiang F, Liu Z X, Wang Y J, et al. A theoretical study on the effect of ozone below cloud on total ozone retrieved by TOMS and a new inversion algorithm. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(2): 364-369.

[7] 王咏梅,王英鉴,王维和等. FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪. *科学通报*, 2009, 54(23): 3778-3783.

Wang Y M, Wang Y J, Wang W H, et al. FY-3 satellite Ultraviolet Total Ozone Unit. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2009, 54(23): 3778-3783.

[8] Mateer C L, Heath D F, Krueger A J. Estimation of total ozone from satellite measurements of backscattered Earth radiance. *J. Atmos. Sci.*, 1971, 28: 1307-1311.

[9] Heath D F, Krueger A J, Roeder H A, et al. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer (SBUV/TOMS) for NIMBUS G. *Optical Eng.*, 1975, 14: 323-332.

[10] Hilsenrath E, Bhartia P K, Cebula R P, et al. Calibration and intercalibration of Backscatter Ultraviolet (BUV) satellite ozone data. *Adv. Space Res.*, 1997, 19(9): 1345-1353.

[11] 王维和,张兴赢,安兴秦等. 风云三号气象卫星全球臭氧总量反演和真实性检验结果分析. *科学通报*, 2010, 55(17): 1726-1733.

- Wang W H, Zhang X Y, An X Q, et al. Analysis for retrieval and validation results of FY-3 total ozone unit (TOU). *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2010, 55 (17): 1726-1733.
- [12] Liu X, Newchurch M J, Loughman R, et al. Errors resulting from assuming opaque lambertain clouds in TOMS ozone retrieval. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 85(3-4): 337-365.
- [13] Stein M L. Spatial variation of total column ozone on a global scale. *Ann. Appl. Statist.*, 2007, 1(1): 191-210.

(本文编辑 何 燕)