

文章编号 1004-924X(2019)02-0326-08

## FY-3C 卫星紫外臭氧总量探测仪的在轨替代定标

张 卓<sup>1,2,3,4,5</sup>, 王维和<sup>6\*</sup>, 王后茂<sup>1,3,4,5</sup>, 王咏梅<sup>1,3,4,5,7</sup>

- (1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 国家空间科学中心 空间环境探测研究室, 北京 100190;
4. 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190;
5. 中国科学院 空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190;
6. 国家气象局 卫星气象中心, 北京 100081;
7. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

**摘要:**风云三号气象卫星 C 星(FY-3C)搭载的紫外臭氧总量探测仪因太阳辐照度观测值异常而无法进行常规在轨星上定标,导致臭氧总量产品无法正常生成。在研究了风云三号气象卫星 B 星(FY-3B)TOU 辐照度观测数据的特点以及仪器衰减规律后,结合 FY-3C/TOU 辐照度和辐亮度实测数据,探索了基于晴空海洋像元观测值计算仪器的衰减系数法。本文选取受陆地气溶胶影响较小的热带太平洋海区,用矢量辐射传输模式模拟云量较小的像元对应的晴空辐亮度,比较观测值与模拟计算值,通过统计筛选晴空像元,估算 FY-3C/TOU 探测器随时间的衰减系数。在确定仪器衰减系数后对 FY-3C/TOU 历史数据进行处理,反演获得了全球臭氧总量并与 WMO/WOUDC 地基观测数据进行对比。结果表明,基于晴空辐亮度估算的仪器衰减系数进行的臭氧总量反演的均方根误差在 5% 以内。在星载紫外探测器星上辐射定标失败的时候,可以利用晴空海洋像元确定仪器的定标系数。

**关键词:**在轨定标;紫外遥感;臭氧总量;风云三号;紫外臭氧总量探测仪;真实性检验

**中图分类号:**TP722.3;X87 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192702.0326

## On-board vicarious calibration of FY-3C UV total ozone unit

ZHANG Zhuo<sup>1,2,3,4,5</sup>, WANG Wei-he<sup>6\*</sup>, WANG Hou-mao<sup>1,3,4,5</sup>, WANG Yong-mei<sup>1,3,4,5,7</sup>

- (1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Laboratory of Space Environment Exploration, National Space Science Center, Beijing 100190, China;
4. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China;
5. Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
6. National Satellite Meteorological Center, China Meteorology Administration, Beijing 100081, China;
7. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangwh@cma.gov.cn

**收稿日期:**2018-03-16; **修订日期:**2018-05-08.

**基金项目:**国家重点研发计划项目(No. 2017YFC0209704); 国家科技部重点研发项目(No. 2017YB0502800, No. 2017YFB0502803)

**Abstract:** Previously, ozone products could not be generated due to the abnormal solar irradiance for a total ozone unit (TOU) on FY-3C, because the instrumental degradation coefficient could not be measured. After investigating the irradiation measurement data and degradation trends of FY-3B/TOU and combining this with FY-3C/TOU radiance and irradiance data, methods for calculating instrumental degradation coefficients were explored based on clear ocean pixel data. An area in the atmosphere above the Pacific Ocean was chosen as a representative “clean” atmospheric sample, which is an area without pollution, to calculate the radiation from the earth and the model radiation with a vector radiative transfer mode. By selecting clear pixels and comparing measured and modeled values, the FY-3C/TOU instrument degradation with time was evaluated. On comparing the new total ozone results with WMO/WOUDC data, it is found that the change in the satellite monitoring data over time and the site results agreed well. Further, the mean square error of the two results is within 5%. Thus, the clear-sky pixels method for FY-3C/TOU works well and has the potential to solve problems regarding in-orbit radiation calibrations.

**Key words:** on-board calibration; Ultra-violet(UV) remote sensing; total ozone amount; FY-3; Total Ozone Unit(TOU); validation

## 1 引 言

风云三号气象卫星(FY-3)系列卫星是中国第二代极轨气象卫星<sup>[1-4]</sup>,和第一代极轨气象卫星风云一号系列(FY-1)相比,除了搭载可见光近红外和热红外成像仪外,FY-3还搭载了用于定量探测大气温湿廓线的微波和红外垂直探测仪器<sup>[5-6]</sup>,用于探测大气臭氧总量和臭氧垂直廓线的紫外仪器等,增强了中国三维大气探测能力。自2008年FY-3A发射以来,FY-3系列卫星共发射了4颗,即FY-3A/B/C/D,其中FY-3A/B/C均搭载了用于探测大气臭氧柱总量全球分布的紫外臭氧总量探测仪(Total Ozone Unit, TOU)<sup>[7-11]</sup>。该仪器主要的科学目标是探测全球臭氧总量,也可以用于观测大气中吸收性气溶胶的存在与否<sup>[12]</sup>。它覆盖的光谱范围为308~360 nm,有6个探测通道,用于探测太阳辐照度和大气后向散射辐亮度。TOU的空间分辨率为50 km(星下点),每天覆盖全球一次。TOU的主要工作原理是在300~360 nm的6个通道中选择两个臭氧吸收差别较大的通道,根据所测的大气后向散射辐亮度和太阳辐照度,计算通道反照率并利用这两个通道反照率的对数差与臭氧总量的关系反演大气臭氧柱总量<sup>[13-14]</sup>。

为了监测探测器随时间的衰减情况,和美国TOMS仪器以及其他星载紫外探测仪类似<sup>[15-16]</sup>,TOU仪器上安装了3块漫反射板作为星上辐射定标系统,此外还安装了用于监测波长漂移的汞

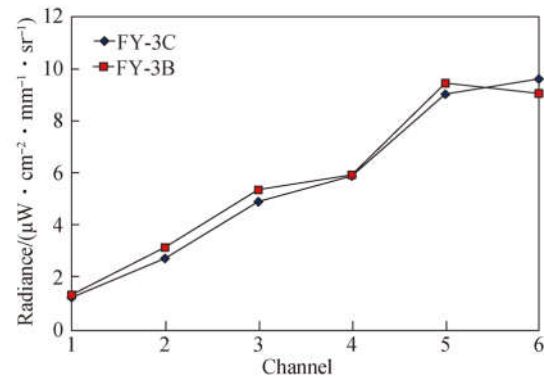
灯。TOU的三块漫反射板分别为盖板(A1)、工作版(A2)和参照版(A3),太阳直射光照射到漫反射板后进入仪器的光学系统进行测量。三块漫反射板安装在一个等边三棱柱的三个面上,通过活动部件控制来选择所需要的漫反射板。根据设计,三块漫反射板的测量频次不同,其中A1板一直暴露在外空环境中,卫星每次经过南极(或北极)地区时进行一次太阳辐照度测量,A2板每周测量一次,A3板每15周测量一次。当不需要A2和A3板测量时,A2和A3板转向仪器内部一面不受太阳辐射,并尽量减小空间环境对其性能的影响。因为A1板连续暴露在太空中,由于太阳强光的照射以及太空环境的影响,A1板衰减很快,通常在半年之内衰减50%以上。和A1板相比,A2板衰减的速度很慢,而A3板因为测量周期更长,一般认为A3板的衰减是可以忽略的,FY-3A/B/TOU的实测数据也证实了这一点。虽然A3板基本上不衰减,但由于测量周期过长,因此必须与A2板的观测相互配合才能实现仪器衰减的动态监测。卫星发射入轨后首先进行太阳辐照度测量,此时三块漫反射板都没有衰减,测量结果是一致的。之后随着时间的推移,除了A1板,A2板也会产生缓慢的衰减,因此需要定期与A3板的观测值进行比对,以计算仪器的时间衰减因子。

FY-3C/TOU第一次入轨开机是在2013年9月30日,随后马上进行太阳辐照度测量,FY-3C/TOU测量的太阳辐照度与FY-3B/TOU相比存在很大的偏差,FY-3B/TOU辐照度与国

际上同类测量相比误差在 2% 之内。臭氧总量的反演是基于辐亮度与辐照度的比值进行的,用 FY-3C/TOU 辐照度的测量结果无法进行臭氧总量的反演,虽然经过订正在短时间内 FY-3C/TOU 的辐照度误差可以控制在 10% 之内,辐亮度的测量结果经过与 FY-3B/TOU 相比证明是正确的;但由于导致辐照度测量系统故障的原因并不清楚,因此长时间辐照度测量结果也无法用于计算仪器的衰减系数。本文在分析 FY-3B/TOU 辐照度数据和仪器衰减规律的基础上,结合 FY-3C/TOU 的实测数据,探索了用晴空海洋像元模拟辐亮度与卫星观测辐亮度对比的方法,直接确定探测器的衰减系数。根据新的衰减系数对发射之后的历史数据重新处理,反演了全球臭氧柱总量,并与 WMO/WOUDC 地基臭氧观测数据<sup>[17]</sup>进行了对比。真实性检验结果表明,基于新的替代定标方法产生的定标系数进行长时间序列的臭氧总量反演误差在 5% 之内。

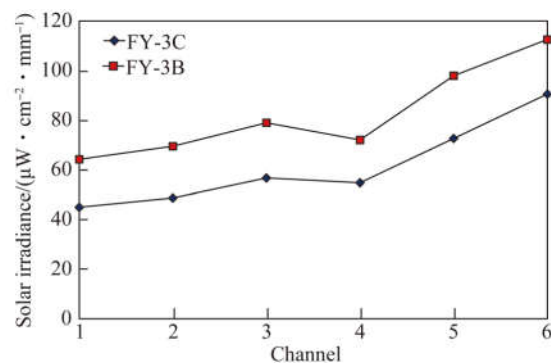
## 2 FY-3C/TOU 测量数据分析

FY-3C/TOU 发射后第一时间测量的太阳辐照度数据与 FY-3B/TOU 经过质量控制的辐照度数据相比,相对偏差在 30% 以上,如图 1(b)<sup>[18]</sup>所示,这样的偏差无法用于臭氧总量反演。但是 FY-3C/TOU 的 TOA 晴空辐亮度和 FY-3B/TOU 相比是基本一致的,如图 1(a)所示。并且利用 FY-3C/TOU 发射后第一时间测量的辐亮度和 FY-3B/TOU 辐照度进行臭氧总量反演,结果也是合理的,如图 2 所示。这说明 FY-3C/TOU 辐亮度测量系统包括分光系统和探测器是没有问题的,问题发生在漫反射板到光学系统这一环节上。Liu 等<sup>[13]</sup>假设漫反射板系统发生了形变,使太阳相对于漫反射板的入射方向计算不准确导致辐照度测量错误,并利用发射前实验室测量的漫反射板双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)特性以及 FY-3B/TOU 测量的经过日地距离修正后的太阳辐照度,将 FY-3B/TOU 的辐照度对 FY-3C/TOU 观测值进行拟合,计算 FY-3C/TOU 漫反射板系统坐标系的偏移量,最后对 FY-3C/TOU 辐照度进行订正。订正结果在一段时间内误差为 10%,但长时间序列的订正结果不理想,依然不能满足长时间监测 FY-3C/TOU 衰减的需求,因此无法保证仪器长期工作后臭氧总量的反演精度。



(a) 海洋上空大气层顶辐亮度

(a) Earth's radiance over sea



(b) 太阳辐照度

(b) Solar irradiance

图 1 FY-3B/C 晴空大气层顶辐亮度和太阳辐照度的对比  
Fig. 1 Comparisons of clear sky earth's radiance and solar irradiance between FY-3B and FY-3C

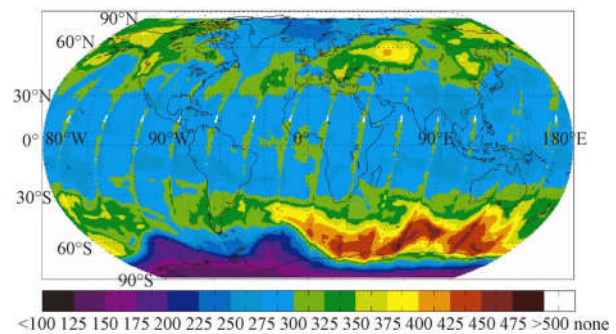


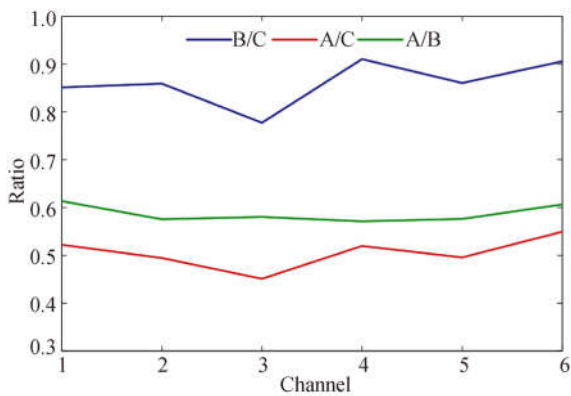
图 2 2013 年 10 月 2 日全球臭氧总量分布(FY-3C/TOU)  
Fig. 2 FY-3C/TOU global total ozone on October 2th 2013

图 3(a) 和 3(b) 分别给出了 FY-3A/B/C-TOU 三者之间实验室定标获得的辐照度响应函数和辐亮度响应函数之比。可以发现,虽然每台仪器的辐照度、辐亮度响应函数不同,但对两种不同的响应函数,三台仪器相互之间的比值却是一致的,即图中相同颜色的图线大小和变化是一致的,这说明该系列仪器的性能相似,且辐照度观测值出现问题的位置不在探测仪内部。另外,结合

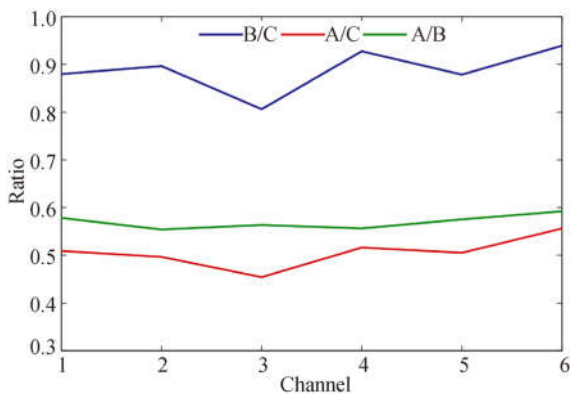
FY-3C/TOU 在轨测得的辐照度同  $\alpha$  角(太阳入射光线与漫反射板坐标系 XOY 平面的夹角)关系的异常,可以判断辐照度测量值的偏差很可能是由于漫反射板的偏转造成的<sup>[14]</sup>。

### 3 晴空海洋辐亮度在轨定标算法

由于漫反射板定标系统的失败,无法利用长时间太阳辐照度观测值监测,可以 FY-3C/TOU 的衰减率,但是辐亮度的正常观测使得利用地面均匀稳定的目标对探测器进行在轨定标成为可行。



(a)Ratio of irradiance response functions for FY-3A/B/C-TOU  
(a)FY-3A/B/C-TOU 辐照度响应函数之比



(b)Ratio of radiance response functions for FY-3A/B/C-TOU  
(b)FY-3A/B/C-TOU 辐亮度响应函数之比

图 3 FY-3A/B/C-TOU 探测器响应函数之间的对比  
Fig. 3 Comparison of response functions among FY-3A/B/C-TOU

FY-3B/TOU 和 FY-3C/TOU 的设计是完全相同的,都采用光电倍增管探测器,为此首先研究了 FY-3B/TOU 探测器的衰减特性。图 4 和图 5 分别给出了 TOU/FY-3B 的 A2 板 6 个通道的太阳辐照度值随时间的变化和 A3 板 1~5 通道测得的太阳辐照度值分别与第 6 通道辐照度的比值。可以看出,尽管仪器衰减使得 6 个通道的辐

照度均产生下降,但 6 个通道观测值之间的变化率始终是一致的,这是因为 6 个通道使用的是同一个光电倍增管。由于 6 个通道的波长相差不是很大,因此衰减特性的光谱效应不强,也就是说仪器的衰减对不同通道观测值的削弱程度是基本相同的,辐亮度观测也是通过同一个光电倍增管实现的,因此可以单独研究其中任一通道以获取仪器的衰减系数,利用各通道变化一致的关系进一步校正其它 5 个通道。

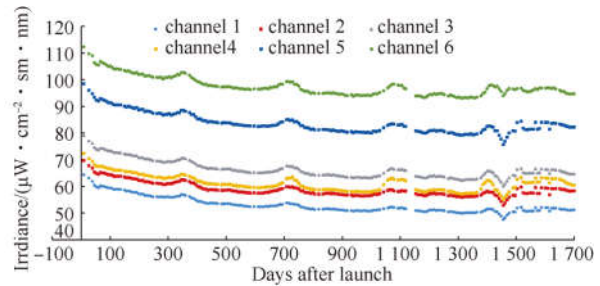


图 4 FY-3B/TOU A2 板 6 个通道的辐照度  
Fig. 4 Irradiance for 6 channels detected by FY-3B/TOU A2 diffuser

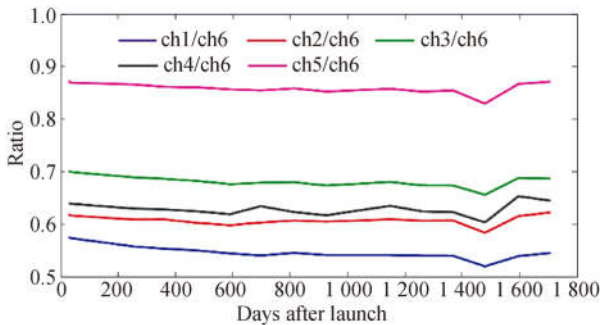


图 5 FY-3B/TOU A3 板测得通道 1~5 辐照度值同第 6 通道辐照度值之比  
Fig. 5 Irradiance ratio of 1—5 channels to 6 channel detected by FY-3B/TOU A3 diffuser

利用晴空海洋像元进行在轨定标的基本思路是比较辐亮度观测值与理论计算值之比随时间的变化,这个变化反应的就是探测器的衰减率。根据已有的研究成果<sup>[19 20]</sup>,在长时间内海洋表面在紫外波段的反射率几乎为一个常量,大约在 5% 左右,另外所选取的太平洋海区为热带太平洋,范围在 30° S ~ 30° N, 161° E ~ 120° W,面积为 6 600 km × 7 600 km,在这片区域几乎不含工业活动和生物质燃烧产生的污染。尽管在远离大陆的海洋区域没有污染过程干扰,仍存在海洋气溶胶。查找了 MODIS 获取的所选取太平洋区域的气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD),计算出从 2013 年 9 月到 2016 年 1 月的月平均

值,如图 6 所示。月平均 AOD 在 0.1 附近且最大值为 0.119 9,该气溶胶含量给 6 个通道获取的辐亮度值造成的偏差分别为 0.512%,0.775%,1.06%,1.32%,1.72%,2.51%。这里选取 AOD 值较低的 2014 年 8 月 3 日进行模拟实验,将这组最大偏差作为一个扰动加入到该时段观测到的星下点像元的辐亮度观测值中,计算得到一条轨道上太平洋中心海区范围内最终臭氧柱总量造成的偏差在 0.5%~0.6%,其余时间的辐亮度偏差值均低于该组值。因此,所选取的太平洋上空区域可以暂时不考虑气溶胶的影响。由于 6 通道(所有通道光谱特性见表 1)受臭氧含量的影响很小,使得它们对云的存在较为敏感,本文用 6 通道作为研究中的标准通道来评估仪器的衰减程度,进而对所有通道辐亮度进行校正。

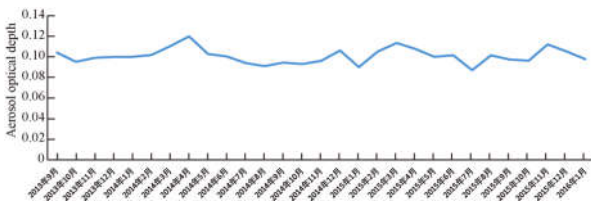


图 6 2013 年 9 月~2016 年 1 月所选太平洋海区月平均气溶胶光学厚度

Fig. 6 Month-average aerosol optical depth in selected Pacific area from September 2013 to January 2016

表 1 TOU 光谱特性

Tab. 1 Characteristic of TOU wavelengths

通道	中心波长	带宽
1	308.68±0.15	1+0.3, -0 <sup>(1)</sup>
2	312.59±0.15	1+0.3, -0 <sup>(1)</sup>
3	317.61±0.15	1+0.3, -0 <sup>(1)</sup>
4	322.40±0.15	1+0.3, -0 <sup>(1)</sup>
5	331.31±0.15	1+0.3, -0 <sup>(1)</sup>
6	360.11±0.25	1+0.3, -0 <sup>(1)</sup>

注:(1)表明通道带宽在 1~1.3 nm。

将 TOU/FY-3B 的臭氧总量测量结果输入模型中,使用逐次迭代法<sup>[21]</sup>求解辐射传输方程模拟大气层顶辐亮度,计算 FY-3C/TOU 第 6 通道辐亮度值与模拟值之比(obs/cal)。空间分辨率越低,晴空像元比率越低,但仍存在一定的晴空像元<sup>[22]</sup>。为排除云等因素的干扰,将所有 obs/cal 描绘出来的散点图除去少量数值过小的离散点,取散点中最小数值包络点作为晴空像来拟合计算仪器的衰减系数。

## 4 数据处理与分析

本文处理了 2013 年 9 月至 2017 年底的全部数据,选取比值 obs/cal 最小的像元作为无云像元,用这晴空像元数据确定仪器的衰减系数。在去掉关机时段及关机时段前后因卫星电源供电不足而产生的不准确数据后,给出了图 7(彩图见期刊电子版)中的观测值同测量值的对比结果。在滤去过小的 obs/cal 值后,获取图中紧邻蓝色 obs/cal 散点区域末端的 obs/cal 包络值(图 7 中标记为红色),利用选取出的这些红色散点值进行拟合,得到了图 7 中黑色曲线作为仪器衰减曲线。计算结果表明,FY-3C/TOU 在发射后 4 年多的时间里大约衰减 5%左右。归一化后获得衰减程度随时间变化的衰减系数如下:

$$f(x) = p_1 \cdot x^2 + p_2 \cdot x + p_3.$$

系数(置信界限为 95%)分别为:

$$p_1 = 2.643 \times 10^{-8} (1.804 \times 10^{-8}, 3.481 \times 10^{-8}),$$

$$p_2 = -7.631 \times 10^{-5} (-8.897 \times 10^{-5}, 6.366 \times 10^{-5}),$$

$$p_3 = 1 (0.9966, 1.004).$$

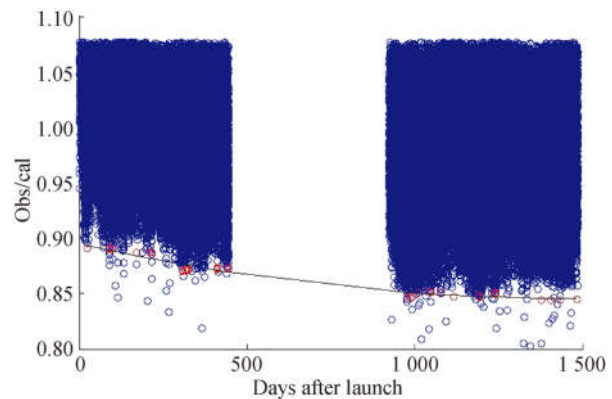


图 7 除去关机前后时段数据的 obs/cal 散点(蓝色)及衰减曲线拟合(黑色)

Fig. 7 Obs/cal scatter points (blue) omitted data in period of shutting down and fitting curve (black) of instrument degradation

## 5 臭氧总量反演与真实性检验

### 5.1 校正后反演结果

FY-3C/TOU 臭氧总量的反演方法与 FY-3A/TOU 相同,均采用通道对法<sup>[7]</sup>。将所获得的衰减系数代入到反演臭氧总量的辐亮度数据中,反演后得到臭氧总量结果。图 8、图 9 分别为 2017 年 10 月 7 日全球和南极地区的臭氧总量分布。

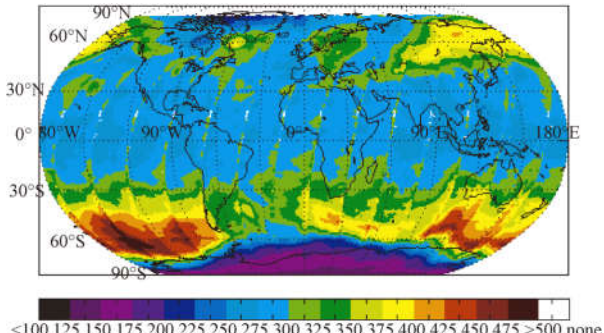


图 8 校正后 2017 年 10 月 7 日 FY-3C/TOU 的全球臭氧柱总量图(单位:Dobson)

Fig. 8 FY-3C/TOU global total ozone on October 7th 2017 after calibration(Dobson units)

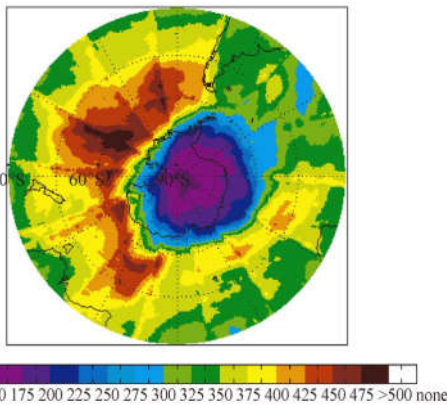


图 9 校正后南极地区 2017 年 10 月 7 日 FY-3C/TOU 的臭氧柱总量(单位:Dobson)

Fig. 9 FY-3C/TOU Antarctic area total ozone on October 7th 2017 after calibration(Dobson units)

### 5.2 地基探测结果及对比

选取 WMO/WOUDC (World Meteorological Organization/World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Center)中 4 个数据记录覆盖时间范围较为完全的地基观测站的臭氧总量观测数据,4 个地基观测站的信息在表 2 中给出。从校正后的 FY-3C/TOU 的臭氧反演结果中选出 4 个地基观测站的位置所对应的臭氧柱总量值进行对比,结果如图 10 所示。校正后获得的臭氧总量观测值同地基探测结果随时间的变化趋势相同,长时间相对均方根偏差小于 5%。

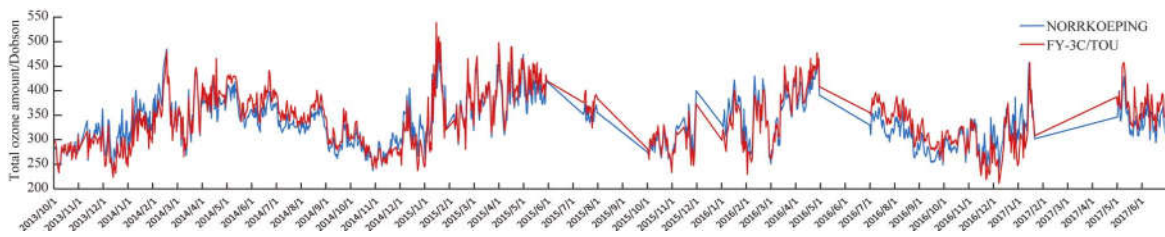
表 2 所选地基台站信息

Tab. 2 Information of selected sites

台站名	国家	纬度	经度
NORRKOEPING	SWE	58.58	16.15
KAUNAS	LTU	54.52	23.54
VALENTIA	IRL	51.93	-10.25
MANCHESTER	GBR	53.48	-2.23

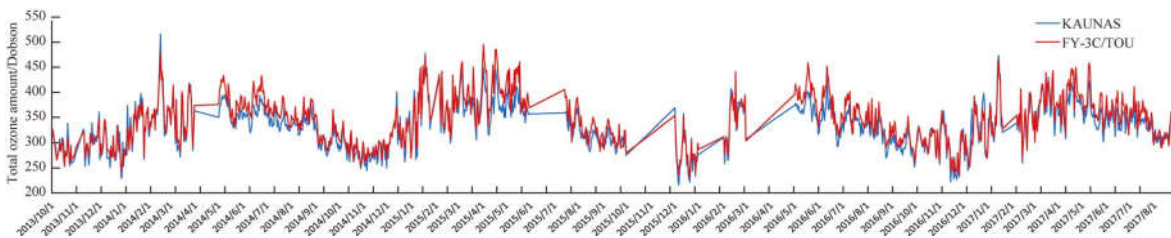
## 6 结 论

本文分析了 FY-3C 所搭载的紫外臭氧柱总量探测仪定标系统出现的问题,由于 FY-3B 6 个通道太阳辐照度随时间的衰减趋势一致,即 6 个通道探测值之间的比率基本不变,提出了 FY-3C/TOU 单通道晴空辐亮度的在轨定标方法。



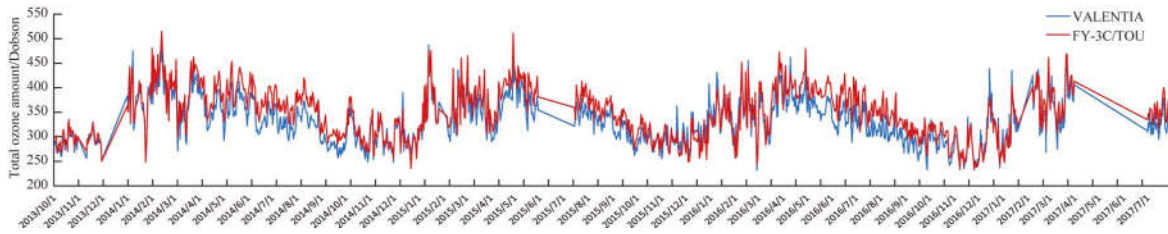
(a)校正后的 FY-3C/TOU 臭氧柱总量同地基 NORRKOEPING 站数据的对比结果

(a)Comparison of FY-3C/TOU total ozone amount after calibration with NORRKOEPING site data



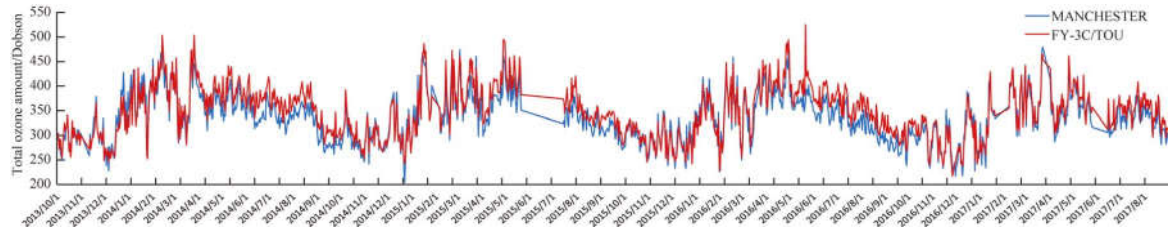
(b)校正后的 FY-3C/TOU 臭氧柱总量同地基 KAUNAS 站数据的对比结果

(b)Comparison of FY-3C/TOU total ozone amount after calibration with KAUNAS site data



(c)校正后的 FY-3C/TOU 臭氧柱总量同地基 VALENTIA 站数据的对比结果

(c)Comparison of FY-3C/TOU total ozone amount after calibration with VALENTIA site data



(d)校正后的 FY-3C/TOU 臭氧柱总量同地基 MANCHESTER 站数据的对比结果

(d)Comparison of FY-3C/TOU total ozone amount after calibration with MANCHESTER site data

图 10 校正后 FY-3C/TOU 臭氧柱总量 WMO/WOUDC 中 4 个站点的探测数据的比较结果

Fig. 10 Comparison of FY-3C/TOU total ozone amount after calibration with 4 sites data in WMO/WOUDC

利用 2013 年 10 月到 2017 年 10 月的第 6 通道辐亮度观测值与辐射传输模型模拟值之比,通过筛选获得晴空像元观测值与理论值之比的长时间变化,给出 FY-3C/TOU 仪器的衰减系数。

与地基观测的臭氧总量数据对比结果表明,由此获得的探测器衰减系数反演的臭氧柱总量能

够准确反演臭氧总量的长时间变化,相对均方根偏差在 5% 以内。这是第一次在定标系统失败后使用替代定标方法对星载紫外仪器进行辐射定标,这种替代定标法的有效性对将来星载高光谱紫外探测仪的在轨定标工作具有重要的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG P, YANG J, DONG C, *et al.*. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A [J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3(3): 367-373.
- [2] DONG C, YANG J, YANG Z, *et al.*. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(10): 1531-1544.
- [3] YANG Z, LU N, SHI J, *et al.*. Overview of FY-3 payload and ground application system [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4846-4853.
- [4] YANG J, ZHANG P, LU N, *et al.*. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2012b, 5(3): 251-265.
- [5] 安大伟, 窦芳丽, 张鹏. 基于 FY-3C 星微波成像仪毫米波通道的海面大风算法研究 [J]. *上海航天*, 2017, 34(4): 38-42.
- [6] 王功雪, 蒋玲梅, 武胜利, 等. FY-3B 与 FY-3C/mwri 交叉定标及雪深算法应用 [J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(1): 49-56.
- [7] WANG G X, JIANG L M, WU S L, *et al.*. Inter-calibrating FY-3B and FY-3C/MWRI for synergistic implementing to snow depth retrieval algorithm [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(1): 49-56. (in Chinese)
- [8] WANG W H, ZHANG X Y, AN X Q, *et al.*. Analysis for retrieval and validation results of FY-3 Total Ozone Unit(TOU) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(26): 3037-3043.
- [9] WANG W, ZHANG X, WANG Y, *et al.*. Introduction to the FY-3A Total Ozone Unit; instrument, performance and results [J]. *International journal of remote sensing*, 2011, 32(17): 4749-4758.
- [9] WANG W, FLYNN L, ZHANG X, *et al.*. Cross-calibration of the Total Ozone Unit(TOU) with the

AN D W, DOU F L, ZHANG P. Study on ocean surface wind speed algorithm based on FY-3C microwave imager millimeter band [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(4): 38-42. (in Chinese)

- Ozone Monitoring Instrument(OMI) and SBUV/2 for environmental applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4943-4955.
- [10] WANG Y M, WANG Y J, WANG W, *et al.*. FY-3 satellite ultraviolet total ozone unit [J] *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(1):84-89.
- [11] 王后茂, 赵其昌, 王咏梅, 等. FY-3A/TOU 与 Metop-B/GOME-2 在轨交叉定标检验分析 [J]. *光学学报*, 2017(1):312-320.  
WANG H M, ZHAO Q C, WANG Y M, *et al.*. Check analysis of in-orbit cross-calibration between FY-3A/TOU and Metop-B/GOME-2 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017(1):312-320. (in Chinese)
- [12] 赵富强, 王维和, 邓小波, 等. 大气臭氧总量与吸收性气溶胶指数的关系 [J]. *遥感学报*, 2017, 21(4): 500-508  
ZHAO F Q, WANG W H, DENG X B, *et al.*. The relationship between absorbing aerosol index and zone and the effect of ozone uncertainty on the retrieval of aerosol index [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 500-508. (in Chinese)
- [13] HEALTH D F, KRUEGER A J, ROEDER H A, *et al.*. The solar backscatter ultraviolet and total ozone mapping spectrometer/SBUV/TOMS/ for nimbus G [J]. *Optical Engineering*, 1975, 14(4): 323-331.
- [14] HERMAN J R, CELARIER E A. Earth surface reflectivity climatology at 340—380 nm from TOMS data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1997, 102(D23): 28003-28011.
- [15] FOWLER W K, NELSON V W. Performance of various diffuser materials in the absolute radiometric calibration of the SBUV-2 [J]. *Metrologia*, 1993, 30(4): 255.
- [16] HILAWNEATH E, HERZIG H H, WILLIAMS D E, *et al.*. Effects of Space Shuttle flight on the reflectance characteristics of diffusers in the near-infrared, visible, and ultraviolet regions [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3675-3682.
- [17] Environment and Climate Change Canada, Toronto (n. d.). World meteorological organization-global atmosphere watch program(WMO-GAW)/World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre(WOUDC) [Z/OL]. <https://woudc.org>. [2017-09-06], [2018-03-07].
- [18] 刘成保, 王维和, 杨磊. FY-3C/臭氧总量探测仪太阳辐照度偏差的修正 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7):1859-1866.  
LIU CH B, WANG W H, YANG L. Revision of solar irradiance of FY-3C/TOU [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7):1859-1866. (in Chinese)
- [19] KLEIPOOL Q L, DOBBER M R, DE HAAN J F, *et al.*. Earth surface reflectance climatology from 3 years of OMI data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*(1984-2012), 2008, 113(D18).
- [20] HERMAN J R, KROTKOV N, CELARIER E, *et al.*. Distribution of UV radiation at the Earth's surface from TOMS-measured UV-backscattered radiances [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D10): 12059-12076.
- [21] DAVE J V. Meaning of successive iteration of the auxiliary equation in the theory of radiative transfer [J]. *Astrophysical Journal*, 1964, 140(3):1292.
- [22] EGCHI N, YOKOTA T. Investigation of clear-sky occurrence rate estimated from CALIOP and MODIS observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(23):1128-1137.

## 作者简介:



张卓(1991—),女,吉林通化人,博士研究生,2013年于吉林大学物理学院获得学士学位,主要从事吸收性气溶胶指数及紫外探测器在轨定标的研究。E-mail:zhangzhuo@mails.ucas.ac.cn

## 导师简介:



王咏梅(1967—),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事中高层大气、电离层光学遥感仪器研制和数据应用方面的研究。E-mail:wym@nssc.ac.cn

## 通讯作者:



王维和(1964—),男,辽宁新民人,学士,正研级高级工程师,1986年于北京大学获得学士学位,主要从事星载紫外探测仪定标和数据处理工作。E-mail:wangwh@cma.gov.cn