

FY-3A/TOU 与 Metop-B/GOME-2 在轨交叉定标检验分析

王后茂¹, 赵其昌², 王咏梅¹, 张 卓¹, 杨晓君¹, 胡秀清³

¹中国科学院国家空间科学中心环境探测室, 北京 100190;

²上海卫星工程研究所载荷室, 上海 201109;

³中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 FY-3A 气象卫星上搭载的紫外臭氧总量探测仪(TOU)是我国首台自主研发的用于日常全球臭氧总量监测的仪器,自 2008 年 5 月发射至 2015 年 3 月已成功在轨运行近 7 年。前期研究表明 FY-3A/TOU 仪器辐射响应存在分段差异特征[辐射值大于和小于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 的仪器响应明显不同],存在双线性响应问题。提出了基于欧洲 Metop-B 卫星上全球臭氧监测实验 2(GOME-2)的探测数据开展紫外波段在轨交叉定标研究方法,进行 FY-3A/TOU L1B 数据的在轨交叉定标检验,用于仪器探测值在轨实时比较和校正。2013 年 2 月—2015 年 2 月两年定标结果表明,2013 年 8 月以前的辐射值比对斜率均为 1 左右,表明 TOU 的探测值在 2013 年 8 月以前比较准确,随后 TOU 与 GOME-2 的比对斜率开始偏大,TOU 探测值相对偏高,表明 FY-3A/TOU 仪器的探测响应发生变化。虽然比对斜率有变化,但两者的探测辐射值一直保持较好的线性相关性($R^2 > 0.96$),因此可以通过交叉定标对 TOU 后期的探测数据进行校正。

关键词 遥感; 大气散射; 在轨交叉定标; 臭氧探测; 臭氧总量探测仪

中图分类号 P407.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0128003

Check Analysis of In-Orbit Cross-Calibration Between FY-3A/TOU and Metop-B/GOME-2

Wang Houmao¹, Zhao Qichang², Wang Yongmei¹,
Zhang Zhuo¹, Yang Xiaojun¹, Hu Xiuqing³

¹ National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

³ National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Ultraviolet total ozone unit (TOU) is one of the main payloads on FY-3A meteorological satellite and the first instrument for daily global coverage of total ozone monitoring is independently designed and manufactured by China. It has been in-orbit for almost seven years from May 2008 to March 2015. The preliminary study shows that the radiation response FY-3A/TOU instrument is different for different spectrum bands [the response of the instrument with radiance larger than $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ is obviously different from the instrument with radiance less than $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$]. It has the problem of bilinear response. A method is introduced for ultraviolet band in-orbit cross-calibration based on the data detected by global ozone monitoring experiment 2 (GOME-2) on European Metop-B satellite. The data of FY-3A/TOU L1B are checked by in-orbit cross-calibration, and then the rea-time comparisons and corrections of instruments' detection values are made. The calibration results

收稿日期: 2016-08-24; **收到修改稿日期:** 2016-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(41471302)

作者简介: 王后茂(1986—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事大气气溶胶和风场反演及交叉定标等方面的研究。

E-mail: hmwang@nssc.ac.cn

导师简介: 胡秀清(1973—),男,博士,研究员,主要从事交叉定标和大气反演方面的研究。

E-mail: huxq@cma.gov.cn(通信联系人)

chosen from February 2013 to February 2015 indicate that the comparison slopes of radiation are all very close to 1 before August 2013, which mean that the detected radiance of TOU is fairly accurate. However, the slopes become a little larger after August 2013, the detected radiance of TOU is relatively larger than GOME-2, which means that the detected response FY-3A/TOU is changed. Although the equation slopes are variant, the relation coefficient between TOU and GOME-2 keeps better linear dependence ($R^2 > 0.96$). It means that the later measurements of TOU can be corrected by use of cross-calibration equation.

Key words remote sensing; atmospheric scattering; in-orbit cross-calibration; ozone observation; total ozone unit

OCIS codes 280.1310; 300.6540; 280.1120

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。自 1979 年开始,臭氧总量绘图系统(TOMS)探测器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^[1-2]。在此之后,一系列的星载紫外探测器被发射并进行全球的臭氧总量及其他痕量气体的探测,如欧洲空间局(ESA)的全球臭氧监测实验 1(GOME-1, 1995—2000)^[3-4]、扫描成像大气吸收光谱仪(SCIAMACHY, 2002—2012)^[5]、GOME-2(2007 至今)^[3]、美国的臭氧监测仪(OMI, 2004 至今)^[2]以及大气臭氧制图廓线仪(OMPS, 2011 至今)^[6-7]等。这些仪器均利用高光谱技术进行大气探测,不仅拓展了它们的反演参数和内容,同时也提高了反演精度。

由中国科学院空间中心研制的臭氧总量探测器(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器^[8],其于 2008 年搭载在第二代极地轨道气象卫星风云三号 A 星(FY-3A)发射。TOU 的成功发射和运行实现了我国臭氧总量探测从无到有的过程,从根本上改变了我国大气臭氧探测和研究的现状。在此之后,FY-3B 星(2010 年)和 FY-3C 星(2013 年)先后搭载 TOU,为我国实时地提供全球的臭氧总量分布监测数据。研究表明,TOU 与地基测量值之间的平均相对偏差为 $-0.16 \pm 4.3\%$,线性相关性达到 0.95,其与美国同类仪器 OMI 的相对误差为 2.52% ^[9]。

GOME-2 是搭载在欧洲空间局和欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)共同研发的气象业务卫星(Metop-A 和 Metop-B)上, Metop-A 于 2006 年发射成功, Metop-B 于 2012 年发射成功。GOME-2 可以进行多种痕量气体及气溶胶等的参数反演(L2 产品),其中臭氧总量产品与地面 Dobson 产品的平均相差为 $2.0 \pm 1.0\%$,与地面 Brewer 产品平均相差 $1.0 \pm 0.8\%$ ^[10]。GOME-2 的 L1B 产品为对地辐射数据,其是由 L1A 数据处理生成的,包括了暗电流校正、像元增益校正、杂散光校正等校正处理^[11]。L1B 数据是 GOME-2 利用太阳对辐射数据进行的长期在轨监测,可以实时地进行所有波段在轨仪器的衰减监测,进而进行数据的实时校正。此外,GOME-2 还利用地面稳定且均一的目标地物(如沙漠、海洋等)进行长期的辐射衰减监测,这可以较好地地对地辐射探测 L1B 数据进行校正^[12]。此外,EUMETSAT 对 GOME-2 L1B 还进行了大量的校正和验证工作^[13-14]。因此,欧洲空间局星载仪器 SCIAMACHY 以 GOME 系列卫星 L1 数据为基准进行自己仪器的定标检验等工作^[15]。鉴于成熟的 GOME-2 L1B 数据在轨监测和定标校正技术,本文将基于 GOME-2 L1B 数据进行 FY-3A/TOU 的在轨交叉定标研究,并对 FY-3A/TOU L1B 进行数据校正。

由于 FY-3A/TOU 探测器在较高辐射探测值区间 [$I_{\text{rad}} > 6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$]与低辐射值 [$I_{\text{rad}} < 6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$]的响应关系不同,自 2008 年发射成功并进行臭氧总量探测以来,许多研究基于大气辐射传输模型进行了 TOU 的在轨定标和校正^[16-18]。本文则基于欧洲空间局探测器 GOME-2 的 L1B 实测数据对 FY-3A/TOU 进行了在轨交叉定标检验研究,基于定标算法对 FY-3A/TOU 2013 年 2 月—2015 年 2 月的探测情况进行了在轨监测,获得两者的线性回归方程,并基于回归系数进行了 TOU 数据的校正。

2 原理及方法

2.1 仪器参数

TOU 是一台采用固定光栅、狭缝阵列式 Ebert-Fastie 单光栅光谱仪^[19]。TOU 空间扫描瞬间视场角为 3.6° ,对应的星下点空间分辨率为 52.6 km,行扫描像元个数为 31 个,扫描范围为 $\pm 54^\circ$,行扫描时间 8.16 s,

对应的刈宽为 2908 km。行扫描结束时,扫描镜会迅速地回到初始位置开始下一次扫描,回扫过程中不进行观测。TOU 设置为 6 个波段,如表 1 所示,每个波段的狭缝函数接近于高斯型,半峰全宽(FWHM)在 1.0~1.3 nm 之间。TOU 在轨辐射定标和波长定标是分别通过漫反射板和 Hg 线灯来实现的,其采用三个漫反射板系统监测漫反射板特性的变化,用以减小星上漫反射板衰变对大气臭氧总量反演精度的影响,漫反射板的定标精度为 3%; TOU 利用监测 296.8 nm Hg 线强度相对变化的方法来实现对仪器波长漂移的监测,定标精度为 0.03 nm^[11]。

表 1 TOU 6 个波段的特征
Table 1 Characteristics of TOU 6 bands

Channel	Central wavelength /nm	Band width /nm
1	308.727	1.164
2	312.638	1.152
3	317.652	1.171
4	322.464	1.156
5	331.375	1.159
6	360.253	1.140

GOME-2 是一台用于监测全球痕量气体和气溶胶的高光谱紫外-可见光仪器,其波段覆盖紫外-可见光波段(240~790 nm),光谱分辨率位于 0.26~0.51 nm,如表 2 所示,对应的空间分辨率为 80 km×40 km,刈宽为 1920 km^[20]。

表 2 GOME-2 各波段的特征
Table 2 Characteristics of GOME-2 bands

Channel	1A	1B	2A	2B	3	4	PDM 5/6
Spectral range /nm	240~383	283~309.7	—	309.8~397.7	397.7~598.4	598.4~790	290~790
Band width /nm	0.29	0.29	0.28	0.28	0.55	0.5	2.9~37
Sample interval / (nm·pixel ⁻¹)	0.07	0.07	0.09	0.09	0.2	0.2	4

由表 1 和表 2 可得,GOME-2 2B 波段范围覆盖了 TOU 的全部 6 个波段,因此选择该波段进行在轨交叉定标研究。

2.2 定标检验方法

以 Metop-B/GOME-2 为基准参考仪器,开展 FY-3A/TOU 在轨定标的检验实验,评估 TOU 在轨定标精度和定标变化情况。具体交叉定标检验流程如下:

1) 轨道预报。目前,简化一般扰动(SGP)轨道预报模型对卫星中高近圆轨道的预报精度可以达到 1 km 以内^[21]。因此,利用该模型预测每天 FY-3A(TOU)卫星与 Metop-B(GOME-2)卫星在 5 min 内的交叉点的地理位置和观测时间,如图 1 所示,用于确定两者交叉定标数据。

2) 像元时间匹配。基于轨道预报交叉点的时间和地理位置,选取可用于匹配的 TOU 和 GOME-2 整轨数据,结合每个数据的观测开始时间和结束时间计算每个像元的观测时间,然后选取观测时间相差小于 5 min 的像元数据。

3) 地理空间位置匹配。紫外波段的辐射大部分会被平流层臭氧吸收,因此地表或者云对紫外辐射的贡献较小,但其受臭氧浓度变化的影响较大。因此,相对于可见光波段,紫外波段的辐射随空间的变化相对比较平缓,但不同地区的辐射值差异可能会较大[如图 2(a)中京津冀地区],尤其是极区区域^[21]。因此为了避免像元空间位置不同而引起的辐射差异(尤其是高纬地区),需要进行像元的地理位置匹配。根据像元经纬度计算它们的球面距离,并选取距离小于 25 km (TOU 像元的一半)的像元参与交叉定标。

4) 观测几何匹配。时间和地理位置匹配的像元不一定满足交叉定标的“同瞳观测”的几何一致性条件^[22-23],因为同一位置像元的时间匹配可以使两者的太阳天顶角是一致的,但不同观测天顶角下的观测辐射值却是不同的。因此,根据像元的观测天顶角进行进一步的数据筛选,选择观测天顶角尽量一致的像元进行匹配,原理为

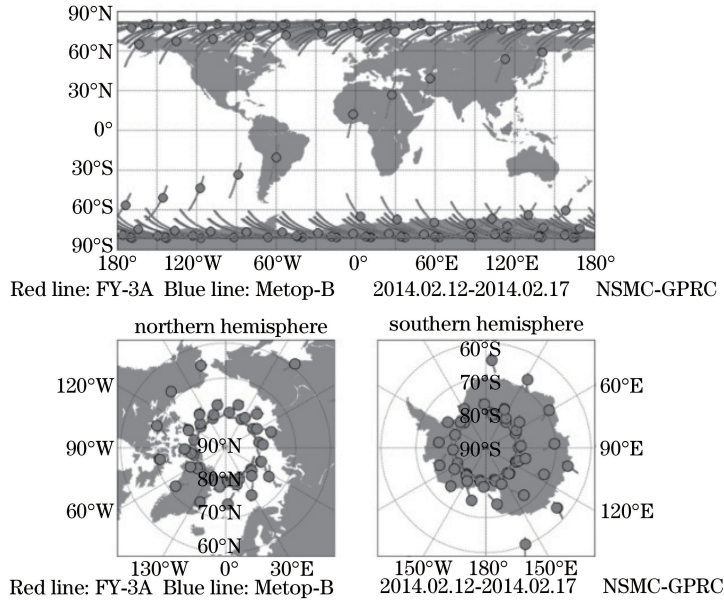


图 1 TOU 和 GOME-2 在 2014 年 2 月 12 日—17 日的轨道交叉点
 Fig. 1 Inter-cross points between TOU and GOME-2 during February 12th-17th, 2014

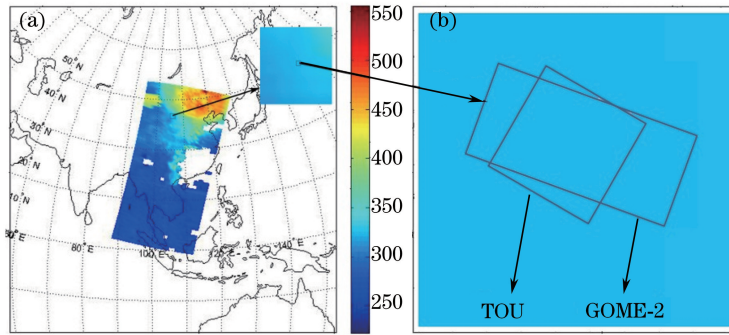


图 2 TOU 和 GOME-2 的空间分辨率。(a) 紫外辐射分布;(b) TOU 和 GOME-2 像元尺寸比较
 Fig. 2 Spatial resolution of TOU and GOME-2. (a) Distribution of ultraviolet radiance;
 (b) comparison of pixel size between TOU and GOME-2

$$\left| \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} - 1 \right| < 0.01, \quad (1)$$

式中, θ_1 为 TOU 观测天顶角, θ_2 为 GOME-2 观测天顶角。

5) 均匀性匹配。TOU 的空间分辨率为 $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$, 而 GOME-2 的空间分辨率为 $40 \text{ km} \times 80 \text{ km}$, 它们的空间分辨率大小和形状存在一定的差异, 如图 2(b) 所示。

由于 TOU 和 GOME-2 的像元分辨率大小和形状不同, 如果观测对象的空间分布变化比较剧烈(高纬极区), 则会引起较大的定标误差^[22]。因此, 需要选择观测区域相对均匀的区域进行交叉定标, 均匀性检测范围设定为 3×3 像元窗口, 筛选原理为

$$\left| \frac{\sigma}{a_{ve}} - 1 \right| < 0.01, \quad (2)$$

式中 σ 为窗口内像元辐射标准差, a_{ve} 为窗口内像元辐射平均值。该均匀性检测大大降低了两个仪器观测视场的非一致性导致的误差。

6) 光谱数据转换与匹配。TOU 的通道带宽约为 1.1 nm , 而 GOME-2 为连续光谱探测, 像元采样间隔约为 0.09 nm , 因此相对于 TOU, GOME-2 可作为高光谱数据。TOU 的光谱响应函数及 GOME-2 的辐射测量值数据如图 3 所示。为了增加数据转换的精度, 对 GOME-2 高光谱数据进行样条插值计算, 将光谱间隔采样为 0.022 nm 。将 GOME-2 采样值与 TOU 光谱响应函数进行卷积:

$$S_{\text{imTOU}} = \frac{\int_{\text{GOME-2}}^R S_{\text{TOU}} d\lambda}{\int_{\text{TOU}}^S d\lambda}, \quad (3)$$

式中 S_{imTOU} 为 GOME-2 卷积后的 TOU 模拟数据, $R_{\text{GOME-2}}$ 为 GOME-2 实测数据, S_{TOU} 为 TOU 光谱响应函数。

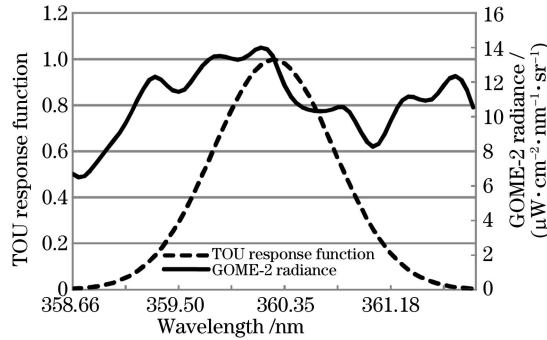


图 3 360 nm 处的 TOU 光谱响应函数和 GOME-2 辐射测量值

Fig. 3 Spectral response function of TOU and measured radiance of GOME-2 at 360 nm

7) 数据比较与回归分析。卷积后的 TOU 模拟数据与 TOU 实测数据进行线性回归分析, 线性回归方程为

$$S_{\text{imTOU}} = a \times M_{\text{TOU}} + b, \quad (4)$$

式中 M_{TOU} 为 TOU 实测值, a 和 b 为线性回归系数。根据回归方程的系数, 可以进行 TOU 仪器的在轨定标监测与分析。

3 结果与分析

通过与基准传感器 GOME-2 的在轨比较, 可以实现对目标传感器 TOU 在轨定标结果的监测, 同时也可以对观测辐射值进行校正。FY-3A/TOU 的设计寿命为 5 年, 2015 年 3 月以后 TOU 就不能获得准确有效的探测数据, 因此选择 2013 年 2 月—2015 年 2 月的数据进行交叉定标, 从而进行设计寿命以内的 TOU 的在轨衰减监测。虽然 GOME-2 2B 波段范围覆盖了所有 TOU 通道, 但是其在 TOU 308 nm 通道的部分探测值是无效的(GOME-2 本身进行的数据筛选), 因此没有进行 TOU 308 nm 通道的交叉定标。此外, FY-3A TOU 在较大观测天顶角下没有进行实验室辐射定标实验, 因此选择 TOU 天底方向 ± 2 个像元内的探测值进行交叉定标(文献 12 中图 5)。同时, 探测器对辐射值大于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 的响应与小于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 的不同, 即探测值小于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 时呈现很好的准确性和线性度, 当大于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 时探测值虽然仍具有较好的线性关系, 但斜率并不一致(图 4)。图 4 为天底观测方向的定标结果, 横坐标为 TOU 的实际观测值, 纵坐标为 GOME-2 与 TOU 仪器函数卷积得到的模拟计算值, 这与文献[12]中图 8 得到的结果一致, 再次验证了 FY-3A/TOU 高低信号具有双线性响应特征。

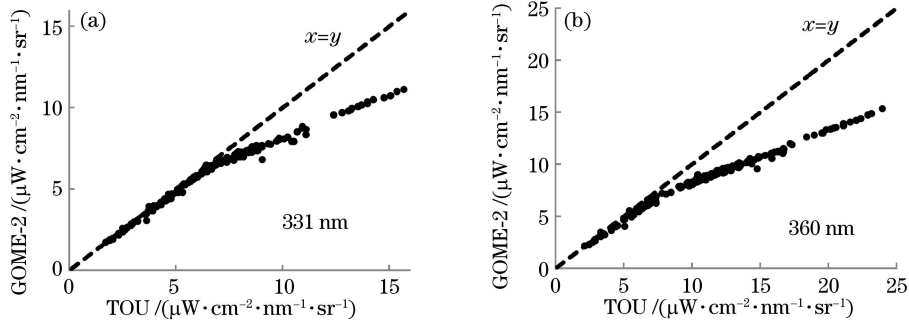


图 4 天底方向 (± 2 像元) TOU 和 GOME-2 的辐射探测值交叉定标结果。(a) 331 nm; (b) 360 nm。

Fig. 4 Cross-calibration results of nadir (± 2 pixels) detected radiance between TOU and GOME-2. (a) 331 nm; (b) 360 nm

3.1 在轨监测

鉴于以上交叉检验分析的可靠性,为了检验 TOU 长期定标的稳定性,选择天底观测条件下且辐射值小于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 的数据进行定标系数在轨监测和比较分析。

图 5(a)~(e)显示了 2013 年 8 月 6 日—11 日的 TOU 5 个波段(312、317、322、331、360 nm)的定标结果。图中,TOU 和 GOME-2 的相关系数均大于 0.96,这表明两者的相关性非常好,且回归方程斜率均为 1 左右,大部分截距小于 0.05,这表明 TOU 的探测值与 GOME-2 的探测值一致。图 5(f)~(j)显示了 2014 年 4 月 1 日—6 日的交叉定标结果,回归方程的斜率相对增加,TOU 的探测值相对偏高,但两者仍呈很好的线性相关性($R^2 > 0.96$),且大部分截距小于 0.05。此外,TOU 312、317、322 nm 三个波段的定标结果要明显好于 331 nm 和 360 nm,前三者的定标斜率更接近于 1,相关系数也相对较高,线性相关性更好。

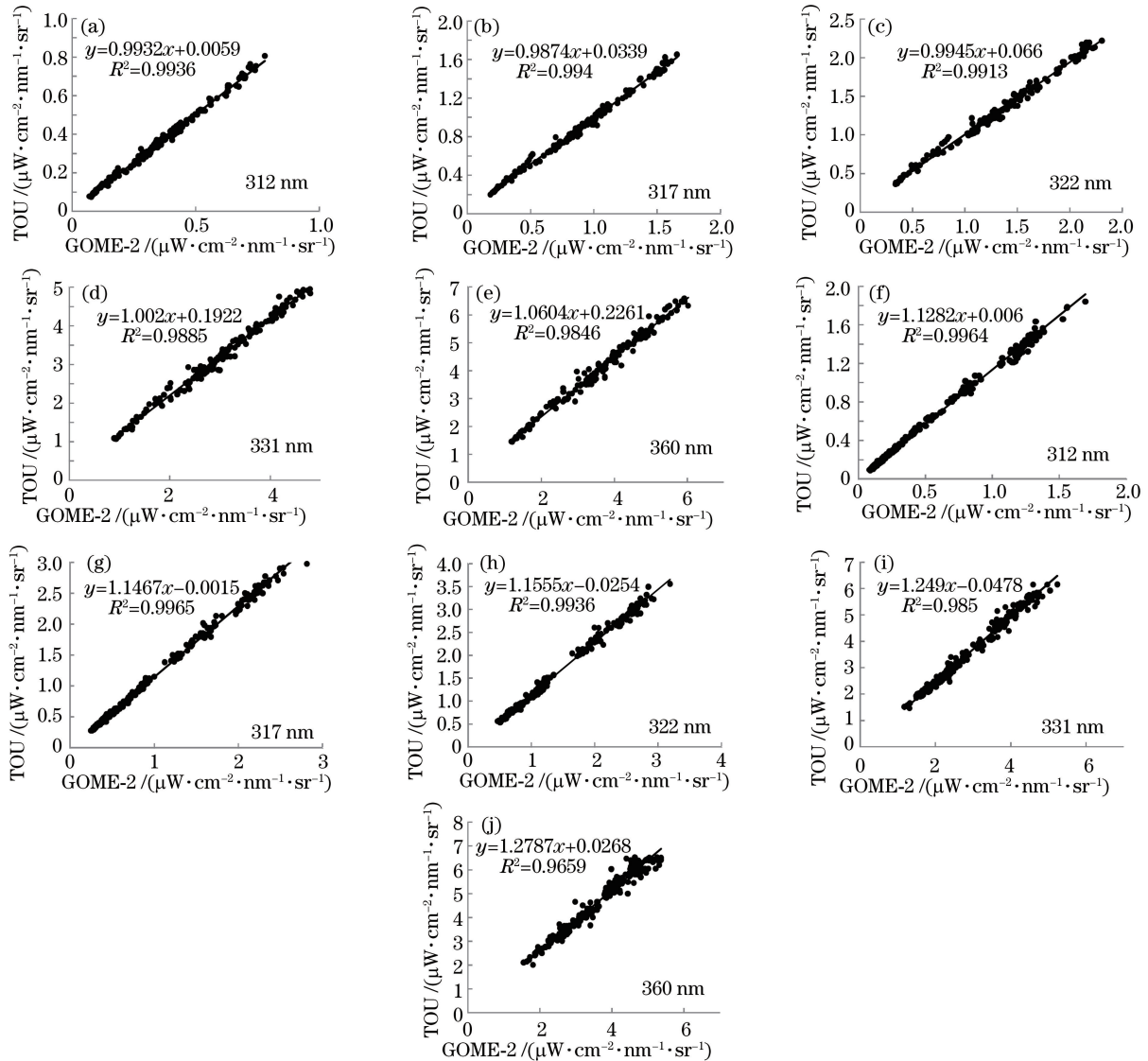


图 5 2013 年 8 月 6—11 日(a) 312 nm;(b) 317 nm;(c) 322 nm;(d) 331 nm;(e) 360 nm 和 2014 年 4 月 1—6 日的交叉定标结果(f) 312 nm;(g) 317 nm;(h) 322 nm;(i) 331 nm;(j) 360 nm

Fig. 5 Cross-calibration results of August 6-11th, 2013 (a) 312 nm; (b) 317 nm; (c) 322 nm; (d) 331 nm; (e) 360 nm and April 1-6th, 2014 (f) 312 nm; (g) 317 nm; (h) 322 nm; (i) 331 nm; (j) 360 nm

根据所提的交叉定标方法,对 2013 年 2 月—2015 年 2 月的 TOU 数据与 GOME-2 数据进行交叉定标。图 6 为 TOU 与 GOME-2 回归方程斜率随时间变化的情况。

图 6 中,2013 年 8 月以前 TOU 5 个波段的方程斜率几乎保持持平,没有较大变化。相比于 2013 年

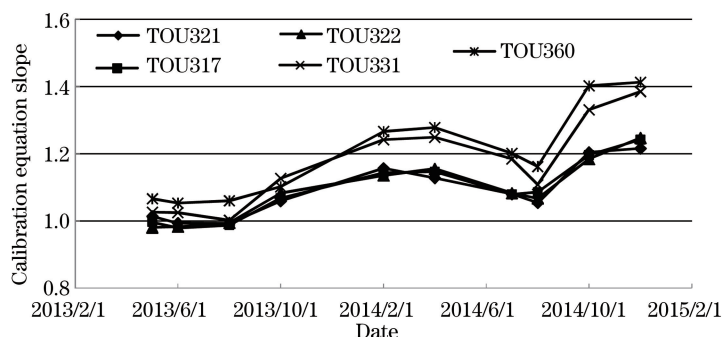


图 6 2013 年 2 月—2015 年 2 月 TOU 和 GOME-2 交叉定标线性回归方程斜率的变化

Fig. 6 Variation of linear regression equation slope of TOU and GOME-2 during February 2013 to February 2015

8 月,2014 年 2 月 TOU 5 个波段的斜率分别增加了 0.135、0.1593、0.161、0.247 和 0.2183。随后斜率先增大后减小,这表明 TOU 自 2013 年下半年开始出现一定程度的变化,探测值开始偏大,变化趋势不稳定,这可能是由于卫星环境温度的变化导致的探测值偏移。

3.2 数据校正

进行 FY-3A/TOU 数据在轨监测的同时,可以利用交叉比对回归方程对偏移的探测数值进行校正。同样,也可以对图 3 中 TOU 的双线性响应探测值进行校正。以 331 nm 和 360 nm 通道为例,将 TOU 每个通道大于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 和小于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 的探测值分别与对应的 GOME-2 探测值进行回归分析,获得回归方程,然后将回归方程应用于其他 TOU 探测值以进行校正。图 7 为 TOU 和 GOME-2 交叉定标前获得的回归方程[(a)、(b)]及校正后的结果[(c)、(d)]比较。

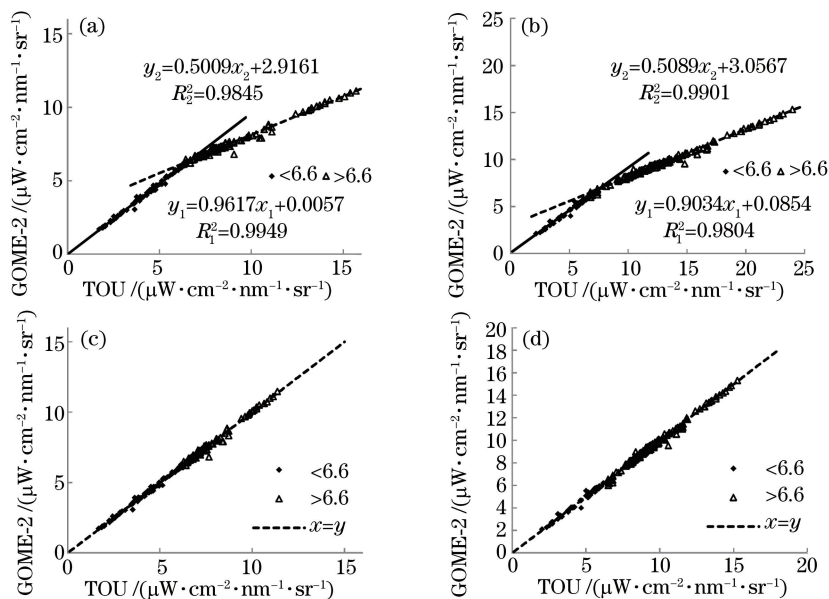


图 7 校正前后 Metop-B/GOME-2 和 FY-3A/TOU 数据对比结果。(a)校正前 331 nm; (b)校正前 360 nm;(c)校正后 331 nm;(d)校正后 360 nm

Fig. 7 Data comparisons of pre-correction and post-correction between Metop-B/GOME-2 and FY-3A/TOU.

(a) Pre-correction of 331 nm; (b) pre-correction of 360 nm; (c) post-correction of 331 nm; (d) post-correction of 360 nm

4 结 论

介绍了利用 GOME-2 L1B 高光谱数据对 FY-3A/TOU 进行在轨交叉定标的方法,并利用这种方法对 TOU 数据进行了在轨监测和校正分析。由于不同地区臭氧总量不同,紫外辐射值也不同。因此,引入了像元的地理位置最近距离匹配计算,从而避免地理位置不同导致的定标误差增大。

定标检验结果表明, FY-3A/TOU 在 2013 年 8 月以前的探测值与 GOME-2 的探测值较为一致。在此之后, TOU 探测辐射值相比 GOME-2 逐渐开始偏高, 变化趋势有一定的波动。但 TOU 和 GOME-2 两者的线性相关性一直很高($R^2 > 0.96$), 因此偏移的 TOU 探测值可以通过交叉比对回归方程对其进行校正。

此外, 还对 FY-3A 双线性响应进行了研究。利用 TOU 大于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 和小于 $6.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 得到的不同回归方程系数对 TOU 辐射数据分别进行校正, 从而解决 FY-3A/TOU 的线性响应不一致的问题。

致谢 感谢中国气象局国家卫星气象中心提供的 FY-3A/TOU L1B 数据, 感谢欧洲气象组织/欧洲空间局提供的 Metop-B/GOME-2 L1B 探测数据。

参 考 文 献

- [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[C]. *Opt Eng*, 1975, 14: 323-331.
- [2] Levelt P F, van den Oord G H J, Dobber M R, *et al.* The ozone monitoring instrument[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1093-1101.
- [3] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, *et al.* The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results[J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56(2): 151-175.
- [4] de Graaf M, Stammes P, Torres O, *et al.* Absorbing aerosol index: sensitivity analysis, application to GOME and comparison with TOMS[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(1): D01201.
- [5] Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, *et al.* SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes[J]. *J Atmos Sci*, 1999, 56(2): 127-150.
- [6] Levelt P F, van den Oord G H J, Dobber M R, *et al.* The ozone monitoring instrument[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1093-1101.
- [7] Remund Q P, Newell D, Rodriguez J V, *et al.* The ozone mapping and profiler suite (OMPS): on-orbit calibration design[C]. *SPIE*, 2004, 5652: 165-173.
- [8] Flynn L, Long C, Wu X, *et al.* Performance of the ozone mapping and profiler suite (OMPS) products[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(10): 6181-6195.
- [9] Wang Yongmei, Wang Yingjian, Wang Weihe, *et al.* FY-3 satellite ultraviolet total ozone unit[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(23): 3778-3783.
王咏梅, 王英鉴, 王维和, 等. FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪[J]. *科学通报*, 2009, 54(23): 3778-3783.
- [10] Liu Li, Zheng Xiangdong, Chen Shu, *et al.* Validation study of FY-3A TOU total ozone using ground-based data[J]. *Chin J Space Sci*, 2015, 35(6): 696-706.
刘 利, 郑向东, 陈 树, 等. 风云-3A 卫星 TOU 臭氧总量地基对比验证分析[J]. *空间科学学报*, 2015, 35(6): 696-706.
- [11] Hao N, Koukouli M, Inness A, *et al.* GOME-2 total ozone columns from MetOp-A/MetOp-B and assimilation in the MACC system[J]. *Atmos Meas Tech*, 2014, 7(9): 2259-2299.
- [12] Wang Fei, Liu Yi, Cai Zhaonan, *et al.* Tropospheric ozone products retrieved from GOME-2[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(2): 316-323.
王 飞, 刘 毅, 蔡兆男, 等. 利用 GOME-2 卫星数据反演对流层臭氧[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(2): 316-323.
- [13] Lang R. GOME-2 / Metop-A level 1B product validation report No 5: status at reprocessing G2RP-R2 v1F[R]. Report EUM, 2012: 1-110.
- [14] EUMETSAT. EPS Metop-B product validation report: GOME-2 level 1[R]. Report EUM, 2013: 1-150.
- [15] Lang R, Munro R, Livschitz Y, *et al.* Gome-2 level 1b operational product validation status[C]. EUMETSAT User Conference, 2008: 1-5.
- [16] Tilstra L G, Stammes P. Intercomparison of reflectances observed by GOME and SCIAMACHY in the visible wavelength range[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17): 4129-4135.
- [17] Wang Weihe, Flynn L E, Zhang Xingying, *et al.* Cross-calibration of the total ozone unit (TOU) with the ozone monitoring instrument (OMI) and SBUV/2 for environmental applications[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4943-4955.

- [18] Jiang Fang, Wang Weihe, Wang Yongmei, *et al.* Calibration in-orbit and retrieval result study of FY-3 total ozone unit (TOU)[J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(3): 760-767.
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[J]. 地球物理学报, 2012, 55(3): 760-767.
- [19] Wang Weihe, Flynn L E, Zhang Xingying, *et al.* Cross-calibration of the total ozone unit (TOU) with the ozone monitoring instrument (OMI) and SBUV/2 for environmental applications[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2013, 3(4): 97-107.
王维和, Flynn L E, 张兴赢, 等. 臭氧总量探测仪(TOU)与臭氧监测仪(OMI)和 SBUV/2 的交叉定标及其在环境中的应用[J]. 气象科技进展, 2013, (4): 97-107.
- [20] Wang Weihe, Zhang Xingying, Wang Yongmei, *et al.* introduction to the FY-3A total ozone unit: instrument, performance and results[J]. Int J Remote Sens, 2011, 32(17): 4749-4758.
- [21] Qi Chengli, Hu Xiuqing, Zhang Liyang, *et al.* Cross-calibration of FY-1C/1D satellite based on hyper-spectral data[J]. Acta Meteorologica Sinivs, 2012, 70(4), 892-901.
漆成莉, 胡秀清, 张里阳, 等. 基于高光谱资料对 FY-1C/1D 气象卫星进行交叉定标[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 892-901.
- [22] Wu X, Liu Q, Zeng J, *et al.* Evaluation of the sensor data record from the nadir instruments of the ozone mapping profiler suite (OMPS)[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(10): 6170-6180.
- [23] Xu Na, Hu Xiuqing, Chen Lin, *et al.* Inter-calibration of infrared channels of FY-2/VISSR using high-spectral resolution sensors IASI and AIRS[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(5): 939-952.
徐 娜, 胡秀清, 陈 林, 等. FY-2 静止卫星红外通道的高光谱交叉定标[J]. 遥感学报, 2012, 16(5): 939-952.
- [24] Xu Na, Wu Ronghua, Hu Xiuqing, *et al.* Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1228001.
徐 娜, 吴荣华, 胡秀清, 等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1228001.