



FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪

王咏梅, 王英鉴, 王维和, 张仲谋, 吕建工, 付利平, 江芳, 陈济, 王继红, 管凤君, 黄富祥, 张兴赢

中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190;
国家卫星气象中心, 北京 100081

E-mail: wym@cssar.ac.cn

2009-01-05 收稿, 2009-04-02 接受

摘要 “风云三号”气象卫星是我国第二代极轨气象卫星, 其上搭载了我国自主开发研制的紫外臭氧总量探测仪 TOU, 它的主要任务是测量地球大气对太阳紫外辐射的后向散射, 以反演地球大气臭氧总量的全球分布, 为环境监测、气候预报和全球气候变化研究提供重要参数。目前已完成了在轨测试, 取得了圆满成功, 即将交付国家卫星气象中心, 进入工程业务化阶段。本文主要介绍 TOU 测量原理、仪器概况, 分析了仪器的灵敏度特性、辐照度测量精度、漫反射板衰变和波长漂移情况以及产品可用性。结果表明, TOU 反演的全球臭氧分布图与 OMI 的臭氧总量产品一致性很好, 均方根偏差约为 5%。这表明利用 TOU 观测数据和我国自主开发的反演技术, 可获得满意的大气臭氧总量全球分布数据。

关键词

紫外臭氧总量探测仪
大气臭氧总量
漫反射板衰变
波长漂移

大气臭氧是地球上一切生命免受过量太阳紫外辐射伤害的天然屏障, 对人类的生存和健康、地球的生态环境、森林植被、农作物和水产养殖等非常重要。然而, 人类活动对大气臭氧的破坏作用已达到相当可观的程度。南极臭氧洞的发现, 引起了全世界的密切关注, 大气臭氧含量的减少已成为当今人类所面临的重大环境问题。监测大气臭氧的时空变化已成为环境遥感的热点和重点。

从 1979 年由 Nimbus 7 卫星 TOMS 探测仪开始的大气臭氧总量紫外后向散射测量以来, 已连续获得了近 30 年的全球大气臭氧总量资料^[1~5]。FY-3 卫星是实现全球、全天候、三维、定量、多光谱遥感的我国第二代极轨气象卫星系列, 2008 年 5 月 27 日成功发射的 FY-3A 卫星是首发星, 为太阳同步轨道卫星, 轨道高度 831 km, 倾角 98°^[6]。FY-3 A 星上首次搭载了我国自行研制的紫外臭氧总量探测仪 (Total Ozone Unit, TOU), 主要任务是测量地球大气对太阳紫外辐

射的后向散射, 以反演地球大气臭氧总量的全球分布, 为环境监测、气候预报和全球气候变化研究提供重要参数。经过 4 个多月的在轨测试, 其各项功能和性能指标稳定, 即将交付国家卫星气象中心, 进入工程业务化阶段。

本文主要介绍了 TOU 测量原理、仪器概况以及主要在轨测试结果以及最终产品可用性分析。

1 测量原理

TOU 是利用大气臭氧对紫外后向散射辐射的吸收进行大气臭氧总量反演的。由于地球大气臭氧高度分布的独特性, 为了保证从卫星上进行大气臭氧总量探测的精度, 探测波段的选取应使其有效散射层处于对流层高度。图 1 给出了对 1976 年美国标准大气的模拟计算结果。从图中看出, 对 302.5 nm 波长, 有效散射层位于臭氧层最大值以上; 而 307.5 nm 波长, 有双峰结构存在。为此, 探测大气臭氧总量的最短波段应选在 >308 nm 的波段。

引用格式: 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: 3778~3783

Wang Y M, Wang Y J, Wang W H, et al. FY-3 satellite Ultraviolet Total Ozone Unit. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0335-8

根据吸收定律, 卫星仪器所接收到的大气紫外后向散射辐射强度 I 粗略可写为

$$I \propto \exp(-n\sigma),$$

这里, n 为大气臭氧含量, σ 为臭氧吸收截面. 这样, 只要知道测量波段的地球外太阳辐射强度, 并测得大气紫外后向散射辐射强度, 由实验室获得的臭氧吸收截面值 σ , 原则上讲, 即可给出大气臭氧总量.

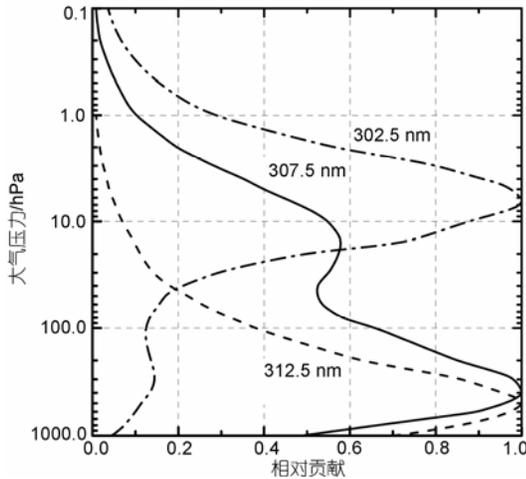


图1 紫外后向散射的权函数特性

采用单波长测量大气臭氧总量的主要问题是对大气紫外后向散射强度的衰减不仅来自大气臭氧, 大气分子散射、气溶胶散射等也引起大气紫外后向散射强度的衰减; 而下垫面的不同也对紫外后向散射强度产生明显影响, 这使得采用单波长测量难以精确获得大气臭氧总量. 为此, 在紫外后向散射测量中, 一般采用波长对方法反演大气臭氧总量, 以消除大气分子散射、气溶胶散射衰减的影响. 而为订正下垫面反射率和云顶高度的影响, 一般采用无吸收的臭氧波段进行下垫面反射率和云顶高度的监测.

事实上, 在大太阳天顶角和臭氧总量较大的高纬地区, 由于有效反射层高度的提高, 采用中、低纬度使用的探测波段将无法获得精确的高纬地区大气臭氧总量. 为此, 需采用多波长对测量.

2 仪器概况

为实现每天给出一幅大气臭氧总量全球分布图的要求, TOU 应具备以下基本特性:

() 为保证大气臭氧总量的反演精度, 要求仪器具有多波长的探测能力, TOU 的探测波段为 6 个, 如表 1 所示. 其中, 360 nm 波段用于下垫面监测, 308

nm 波段具有一定的大气 SO₂ 监测能力.

() 必须进行二维扫描. 其中一维由卫星轨道运行实现, 另一维由仪器扫描镜完成.

() 为保证约 50 km 的星下点地面分辨率, 要求光谱仪具有快速的波长扫描能力. TOU 采用固定光栅、狭缝阵列式光谱仪系统, 由波长选择器完成波长扫描.

() 仪器应保证波长选择器与探测信号精确同步, N7/TOMS 仪器正是由于这一同步问题而造成整机失效 [4].

() 为减小辐射带南大西洋异常区对光电倍增管零点漂移的影响, 仪器将对测量的辐射信号进行调制.

() 为减小星上漫反射板衰变和仪器波长漂移对大气臭氧总量反演精度的影响, 本仪器采用 3 漫反射板系统, 监测漫反射板特性的变化; 利用监测 296.8 nm Hg 线强度相对变化的方法, 实现对仪器波长漂移的监测.

TOU 由探测头部和电控箱两部份组成, 其中探测头部为一个光栅光谱仪, 负责完成对 6 个紫外波段后向散射辐射和太阳辐照度信号的选取和测量, 并具备星上定标功能; 电控箱负责整机供电、运行控制、数据采集以及与卫星总体通讯等. 仪器的主要技术指标如表 1 所示.

表 1 TOU 主要技术指标

项目	指标		
测量中心波段/nm	308.68±0.15	312.59±0.15	317.61±0.15
	322.40±0.15	331.31±0.15	360.11±0.25
光谱分辨率/nm	1.0+0.3, -0.0		
灵敏度	≤0.004 μW/cm ² ·sr·nm (S/N=1)		
动态范围	10 ⁴		
杂散光	<10 ⁻³		
扫描宽度	±54°		
星下点地面分辨率	~50 km		
光谱定标精度	0.03 nm		
辐亮度、辐照度定标精度	2%		
漫反射板定标精度	3%		

仪器有 3 种工作模式, 即对地扫描、辐射定标和波长监测模式. 对地扫描为 TOU 的主工作模式. 辐射定标模式每圈轨道运行一次. 波长监测模式约 2 d 运行一次.

2.1 扫描系统

TOU 扫描系统采用 45°物方扫描镜, 由步进电机

驱动,扫描方向垂直卫星轨道平面,扫描角为每步 3.6° ,共31个扫描点,扫描范围为 $\pm 54^\circ$.

2.2 光学系统

TOU 光学系统包括前光学系统、单色仪系统、波长选择调制器和后光学系统等部分.前光学系统用于仪器视场与光谱仪的相对孔径相匹配和减小大气散射光偏振特性对测量的影响.单色仪系统采用固定光栅、狭缝阵列式 Ebert-Fastie 单光栅单色仪,它和波长选择调制器相配合,实现对探测波段的快速选取和探测信号、暗流的交替测量,以减小云层和南大西洋异常区对测量结果的影响.后光学系统用于将通过出射狭缝阵列的紫外辐射聚焦到光电倍增管的光阴极上,并减小光电倍增管光阴极表面灵敏度不均匀性的影响.

2.3 电子学系统

TOU 电子学系统包括微电流放大器、锁相稳速电路、步进电机驱动器、高压电源、波长监测电源和信号采集-控制接口电路、CPU-远置单元和二次电源等.

仪器采用双碱阴极光电倍增管作为探测器,输出信号经微电流放大器供给 A/D 转换.微电流放大器为 3 种增益并联输出的放大器,由 CPU 系统选取适当的信号进行 AD 转换,以保证系统的快速响应和增大系统的动态范围.高压电源供给光电倍增管工作所需的工作电压.锁相稳速电路用于驱动直流无刷电机,以使波长选择调制器稳速转动;步进电机驱动器用于驱动空间扫描镜和漫反射板定标部件,实现仪器的空间扫描和星上辐射定标.波长监测电源用于点燃光谱汞灯,实现星上波长监测.信号采集-控制接口电路用于实现对各波段测量信号的采集、A/D 转换、数据预处理和整机的运行控制等功能.CPU-远置单元用于实现科学数据和工程参数的采集、打包,并通过 1553B 总线实现与卫星总体的通讯.

3 在轨运行初步结果

紫外臭氧总量探测仪从 2008 年 6 月 3 日开机运行,到 10 月底已完成了在轨测试.在轨测试期间利用工程参数和科学数据对 TOU 在轨工作情况进行了全面分析,并将大气臭氧总量反演结果与国外在轨运行的大气臭氧总量探测仪器 OMI 的产品进行了对比,以判断 TOU 的工作状态和产品的可用性.

3.1 波长漂移

TOU 利用监测通过第 1, 2 出射狭缝 296.8 nm 汞

发射线强度的相对变化进行光谱仪波长漂移的监测,图 2 给出了从本仪器开机到 11 月 18 日的波长漂移情况.可以看出,与实验室定标相比,仪器的探测波长变化了约 -0.065 nm;而在 5 个多月的时间里 TOU 波长漂移的均方根偏差约为 0.002 nm,最大变化小于 0.01 nm.由于在此期间仪器环境温度变化很小,未发现明显的温度波长漂移.与其相比, M3/TOMS 的探测波长变化为 -0.11 nm,星上波长漂移为 0.25 nm^[8],而 AEDOS/TOMS 的波长变化为 0.15 nm,波长漂移为 0.02 nm^[9].

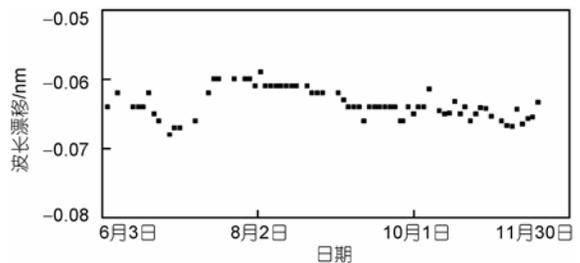


图 2 TOU 波长漂移的测试结果

3.2 灵敏度

在空间环境条件下,光电倍增管的暗流将受到高能粒子的严重影响,特别是在南大西洋异常区和高纬地区,影响更为明显^[10].仪器灵敏度分布情况对了解仪器工作状态和数据反演非常重要.图 3(a)给出了 2008 年 7 月 18 日实测的 TOU 仪器灵敏度分布图.从图中看出,除南大西洋异常区和极区外,仪器灵敏度 $< 0.004 \mu\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$,而在南大西洋异常区和南极地区仪器灵敏度约降低一个量级;但与早期的 N4/BUV 仪器相比^[11],本仪器对高能粒子的屏蔽效果提高了约 2 个量级.图 3(b)给出了太阳低年,900 km 高度能量 > 3 MeV 的电子通量等值线分布图^[12].可以看出,TOU 的灵敏度分布图与 > 3 MeV 电子的分布图非常相似,这表明本仪器对 < 3 MeV 的电子进行了较好的屏蔽.

3.3 太阳辐照度测量

考虑到空间环境对仪器的可能影响,为保证测量精度和长期稳定性,仪器在轨运行中需要进行星上辐射定标.由于 300~360 nm 波段太阳辐射基本不变,TOU 辐射定标采用太阳辐射为基准,通过测量经漫反射板的太阳紫外辐射来实现.为了减小漫反射板反射率在空间环境下衰变的影响,本仪器采用了三漫反射板系统,即盖板、工作板和参考板.盖板(A1

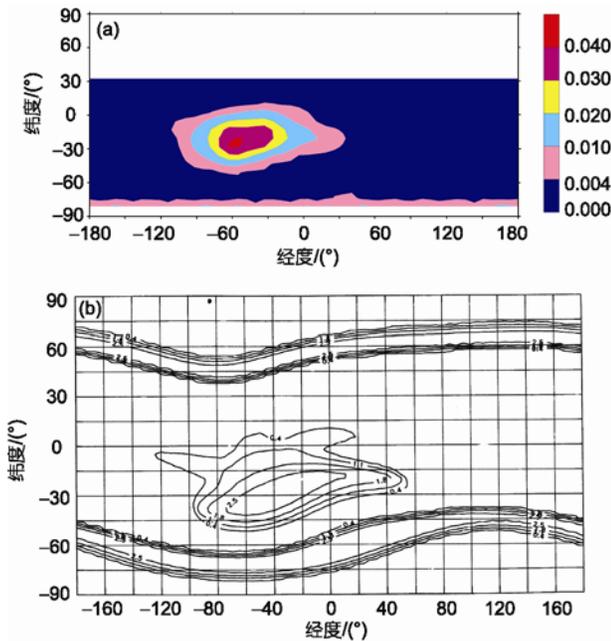


图 3

(a) TOU灵敏度的测试结果(单位: $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$); (b) 太阳低年, 900 km高度电子能量 >3 MeV的等值线图 [12], 图中数字为电子通量($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的对数

板)每圈轨道定标一次, 工作板(A2板)约7 d定标一次, 参考板(A3板)约3个半月定标一次。

图4给出了TOU漫反射板辐照度测量值(图中方块点)与美国UARS卫星SOLSTICE仪器测量值的比较。可以看出对308, 312, 318, 322 nm 4个短波通道TOU与SOLSTICE太阳辐照度测量结果一致; 而在331和360 nm两个长波通道, TOU的测量结果明显大于UARS的测量结果, 相对偏差在15%~20%之间, 分析原因可能是由于星体温控膜引起的杂散光影响所致。对温控膜光谱反射率的测量和对仪器漫反射板视场特性的分析, 初步证实了这一结论。

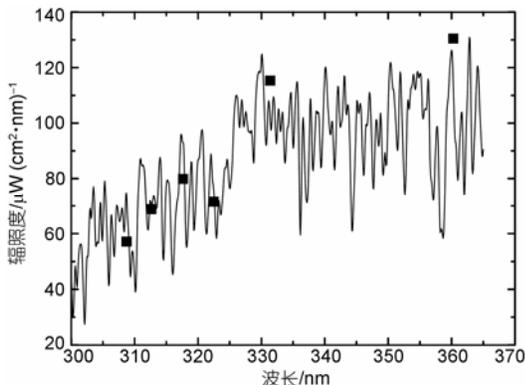


图 4 TOU与UARS辐照度测量结果对比

图5给出了TOU漫反射板(A2)312 nm通道开机以来各次辐照度测量值的相对变化。可以看出, 其均方根偏差小于0.5%, 这表明TOU在星上开机以来具有很好的稳定性。

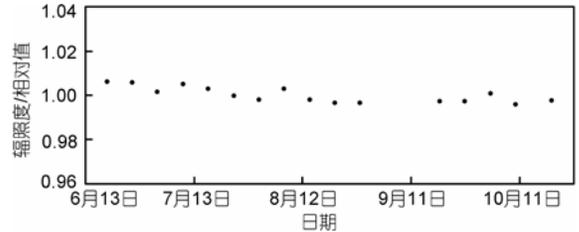


图 5 TOU漫反射板(A2)的稳定性

TOU仪器的辐照度定标在北极上空进行, 与ADEOS/TOMS相似, 原子氧对漫反射板的衰变有着严重影响 [13]。表2给出了TOU仪器A1板与ADEOS/TOMS盖板衰变 [3]的比较。可以看出, 由于TOU采取了限制漫反射板视场等措施, 其漫反射板衰变略小于ADEOS/TOMS, 但远大于其他在南极上空进行辐射定标的TOMS仪器 [14]。

表 2 漫反射板 308 nm 波段衰变的比较

运行时间	FY-3/ TOU-A1 板	ADEOS/TOMS 盖板
1个月	0.937	0.89
2个月	0.876	0.80
3个月	0.806	0.72
4个月	0.695	0.63

3.4 臭氧总量产品示例

TOU的最终目的是实现我国对大气臭氧总量全球分布的测量。为此, 利用在轨测试期间TOU的观测数据, 进行了全球臭氧总量反演试验, 并与AURA卫星的OMI产品(<http://toms.gafcnasa.gov/>)做了比较。作为例子, 图6给出了2008年7月18日TOU全球臭氧总量反演结果以及同日的OMI臭氧总量产品。可以看出, 对于中、低纬度和部分高纬度地区, TOU反演的全球臭氧分布图与OMI的臭氧总量产品一致性很好, 臭氧分布的细节也表现得很充分。图7给出了TOU和OMI反演大气臭氧总量偏差的直方图。可以看出, 偏差小于5%的数据点约占80%。从对2008年7~10月, 大气臭氧总量的反演结果看, TOU和OMI均方根偏差约为5%, 仅在个别地区如极区, 偏差在10%以上。这表明利用TOU观测数据和我国自主开发的反演技术可获得满意的大气臭氧总量全球分布数据。

分析TOU和OMI反演大气臭氧总量偏差的原因,

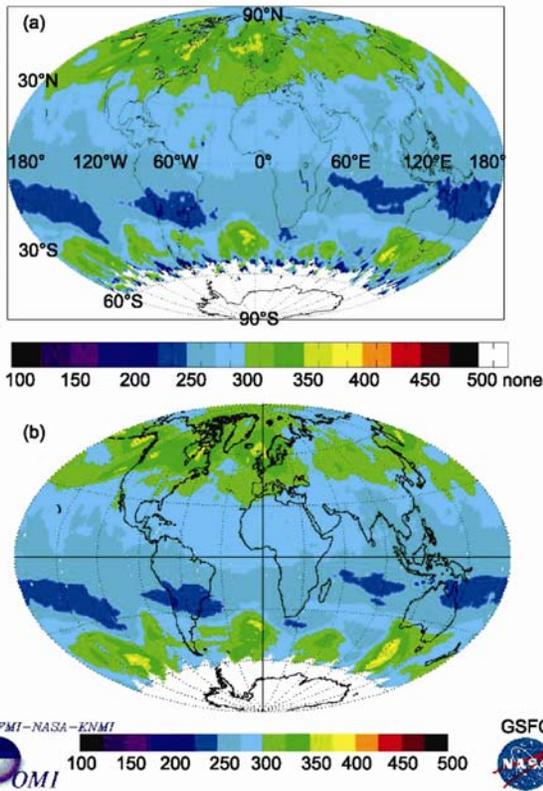


图6 2008年7月18日的全球臭氧总量产品
(a) TOU, (b) OMI

首先是 FY-3 卫星和 AURA 卫星的轨道差异, TOU 与 OMI 的观测时间相差 4 h 左右, 考虑到大气变化和观测几何条件的差异, 反演结果出现相对偏差是合理的; 其次, 在极区, 由于太阳高度角偏低, 仪器的信号变弱, 使得辐射传输的计算误差增大, 进而影响反演精度; 这些都是造成反演结果偏差的重要原因。

南极臭氧洞出现在每年的 9~11 月份. TOU 在轨连续工作, 使得我国首次开展了对南极臭氧洞的星上连续观测. 作为产品示例, 图 8 给出了 2008 年 10 月 14 日南极臭氧总量分布的观测结果. 可以看出, 南极臭氧洞分布区域和强度, 这一时间基本上为南

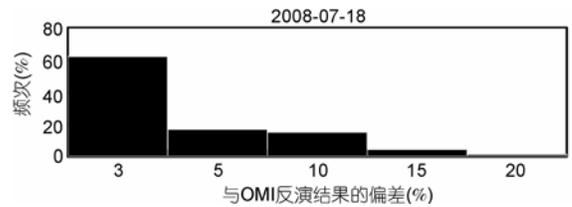


图7 TOU 和 OMI 反演臭氧总量产品偏差的直方图

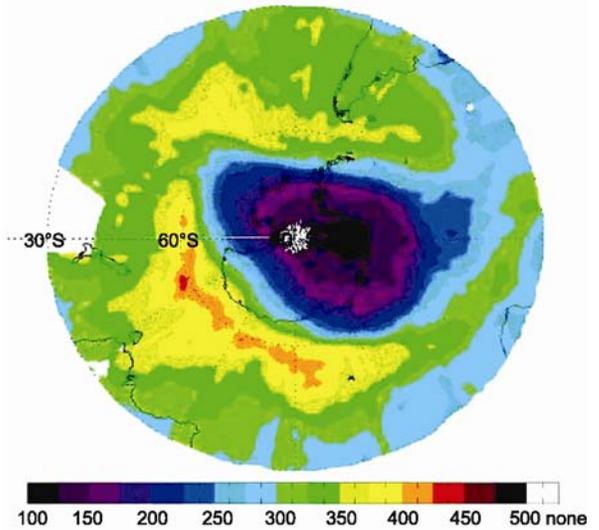


图8 南极臭氧洞观测结果(2008-10-14)

极臭氧洞最强的时间。

4 结论

我国自主开发研制的紫外臭氧总量探测仪 TOU 搭载于“风云三号”气象卫星, 首次实现了我国对大气臭氧总量的全球探测, 并利用我国自主开发的反演技术, 可以获得每天一幅的全球臭氧总量分布图. 从在轨测试期间的数据分析, TOU 工作状态良好, 仪器主要性能与国外同类仪器相当, 部分性能略高于国外同类仪器; 从大气臭氧总量产品看, 其反演产品与目前国际上在轨运行的臭氧探测载荷产品相当, 这表明我国首次自主研制的星载紫外臭氧总量探测从仪器研制到产品开发取得了阶段性成果。

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. *Opt Eng*, 1975, 14: 323—331
- 2 Jaross G, Krueger A J, Cebula C, et al. Calibration and postlaunch performance of the METEOR 3/TOMS instrument. *J Geophys Res*, 1995, 100: 2985—2995 [\[DOI\]](#)
- 3 Krueger A J, Jaross G. TOMS/ADEOS instrument characterization. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37: 1543—1549 [\[DOI\]](#)

- 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, 1998
- 5 Levelt P F, van den Oord G H J, Dobber M R, et al. The ozone monitoring instrument. *IEEE Trans Geos Remote Sens*, 2006, 44: 1093—1101[DOI]
- 6 董瑶海, 孙允珠, 王金华, 等. FY-3A 极轨气象卫星. *上海航天*, 2008, 5: 1—11
- 7 McPeters R D, Bhartia P K, Krueger A J, et al. Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. NASA RP 1384, 1996
- 8 Herman J R, Bhartia P K, Krueger A, et al. Meteor-3 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide, NASA/RP-96-1393, 1996
- 9 Krueger A, Bhartia P K, McPeters R, et al. ADEOS Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide, NASA/TP-98-206857, 1998
- 10 Beatty M E, Debnam W J, Meredith B R. Effects of 1- and 2-MeV Electrons on Photomultiplier Tube. NASA TN D-8125, 1976
- 11 Heath D F, Mateer C L, Krueger A J. The backscatter ultraviolet (BUV) experiment. *Pure Appl Geophys*, 1973, 106-108: 1238—1253[DOI]
- 12 都亨, 叶宗海, 主编. 低轨道航天器空间环境手册. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 13 王英鉴. 空间环境对漫反射板的影响. *空间科学学报*, 2002, 2: 52—57
- 14 Jaross G, Cebula C, DeLand, et al. Backscatter ultraviolet instrument solar diffuser degradation. *Proc SPIE*, 1998, 3427: 432—444[DOI]