

FY-3星紫外臭氧总量探测仪 (TOU) 监测大气臭氧及吸收性气溶胶

王后茂¹ 王咏梅^{1,3} 王维和² 张卓¹

(1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2 国家卫星气象中心, 北京 100081;
3 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: FY-3卫星上搭载的紫外臭氧总量探测仪 (Total Ozone Unit, TOU) 是我国首台自主研发的用于全球臭氧总量监测的仪器, 自2008年5月至今已有3台仪器搭载在气象卫星 (FY-3A/FY-3B/FY-3C) 上成功发射并在轨运行。TOU利用紫外波段进行臭氧总量反演, 以获得全球臭氧的分布及其变化。2013年, 针对我国灰霾、沙尘等气溶胶污染事件频发的环境问题, TOU紫外探测数据被成功用于吸收性气溶胶指数 (AAI) 的反演, 之后TOU被用于我国吸收性气溶胶污染事件的监测, 为沙尘、灰霾等的预报提供监测数据。对TOU的数据和产品的质量和应用进行了介绍, 包括L1B数据、臭氧总量产品及AAI指数。在此基础上, 根据现有仪器的不足, 对后续仪器的发展方向进行了阐述。

关键词: 紫外臭氧总量探测仪, L1B数据, 臭氧总量, 吸收性气溶胶指数

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.005

Ozone and Absorbing Aerosol Measurements by Ultraviolet Total Ozone Unit (TOU) of FY-3 Satellites

Wang Houmao¹, Wang Yongmei^{1,3}, Wang Weihe², Zhang Zhuo¹

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

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

3 University of Chinese Academy of Sciences, School of Astronomy and Space Science, Beijing 100049)

Abstract: Total Ozone Unit (TOU) is one of the main instruments on the FY-3A/B/C satellites and the first instruments in China to monitor daily total ozone coverage globally. They have been in orbit since May 2008. Total ozone is retrieved by ultraviolet radiance to observe global ozone distribution and its variation. Then, the absorbing aerosol index (AAI) is retrieved using 331 nm and 360 nm. Data from 2013 were used to observe atmospheric pollution such as smog, dust storm, and biomass burning in China. In this paper, the quality and application of TOU data are shown and discussed, which include L1B radiance, total ozone, and AAI. The direction of future instruments is discussed.

Keywords: ultraviolet total ozone unit, L1B data, total ozone, absorbing aerosol index

0 引言

近年来, 我国气溶胶大气污染事件 (如沙尘、灰霾等) 的发生越来越频繁, 尤其在我国北方地区, 除受沙尘天气的影响外, 受灰霾的影响也较大^[1]。灰霾等污染事件伴随的主要污染物为气溶胶和痕量气体 (O₃、SO₂及NO₂等), 因此对它们进行大范围的星载监测有助于我国大气环境污染的预报。

国际上对痕量气体和气溶胶的星载监测起步于20世纪70年代。1979年, TOMS (Total Ozone Mapping

Spectrometer) 探测仪利用大气紫外后向散射已连续进行近30年的全球大气臭氧总量反演, 并利用吸收性气溶胶指数进行吸收性气溶胶监测^[2-3]。之后, 一系列的星载紫外探测仪器被发射并进行痕量气体的探测, 如欧洲空间管理局的GOME-1^[4-5]、SCIAMACHY^[6]、GOME-2^[4], 以及美国的OMI^[3]和OMPS^[7-8]等。此外, 这些仪器还进行吸收性气溶胶指数的反演^[9-11], 用于吸收性气溶胶的监测, 如灰霾、沙尘、生物燃烧及火山灰等。

由中国科学院国家空间科学中心研制的臭氧总量探测仪 (TOU) 是我国自主开发研制的用于全球臭氧总量监测的仪器^[12], 于2008年开始搭载在气象卫星风云三号A星 (FY-3A) 发射, 之后的FY-3B星和

收稿日期: 2017年11月24日; 修回日期: 2018年5月3日
第一作者: 王后茂 (1986—), Email: hmwang@nssc.ac.cn
资助项目: 科技部国家重点研发计划课题 (2017YFB0502803)

FY-3C星先后搭载TOU发射成功, 至今已有三台TOU仪器在轨运行。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, 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 $-0.16\% \pm 4.3\%$, 线性相关系数达到0.95, 其与美国同类仪器OMI的相对误差为2.52%^[13]。2013年, FY-3/TOU数据被成功地用于紫外吸收性气溶胶指数的反演, 进而进行我国灰霾、沙尘及生物质燃烧等吸收性气溶胶的监测。

TOU是一台采用固定光栅、狭缝阵列式Ebert-Fastie单光栅光谱仪^[14]。TOU空间扫描瞬时视场角为 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 $\pm 54^\circ$, 行扫描时间为8.16 s, 对应的刈宽为2908 km。TOU探测波段为6个(表1), 每个波段的狭缝函数接近于高斯型, 带宽(FWHM)在1.0~1.3 nm^[15]。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定标特性的变化, 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, 漫反射板的辐射定标精度为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, 波长定标精度为0.03 nm^[16]。

表1 TOU的光谱设置及特征
Table 1 Characteristics of the six TOU 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

FY-3A/FY-3B/FY-3C TOU利用臭氧总量进行全球臭氧分布及变化的监测, 利用反演获得的AAI指数对吸收性气溶胶(如灰霾、沙尘和生物质燃烧等)的空间分布特征进行监测。本文将对TOU的探测原理、数据产品及应用进行综合介绍。

1 基本原理

1.1 臭氧总量反演原理

不同波长的紫外后向散射强度的差异与臭氧总量之间存在着密切关系, 基于这个关系进行TOU臭氧总量的反演。目前, 国际上主要有两种反演方法, 分别为TOMS^[17-18]和差分吸收DOAS^[19-20]算法。其中, TOMS算法有两个版本, 分别为TOMS V7^[17]和TOMS V8^[18], 其被应用于美国NIMBUS-7/TOMS和AURA/

OMI仪器进行臭氧总量的反演; 而DOAS算法则被应用于美国AURA/OMI仪器、欧州空间管理局GOME系列仪器^[19]及SCIAMACHY仪器^[20]。FY-3/TOU臭氧总量算法与TOMS V7基本类似, 但略有区别。TOU反演算法在不同的纬度带采用不同的通道组合来计算臭氧总量初估值, 再分别与360 nm通道组合对辐射定标的影响进行订正, 给出臭氧总量精确值^[21]。

利用太阳紫外后向散射反演臭氧和其他痕量气体时, 通常使用通道辐亮度与太阳辐照度的比值即N值

$$N = -100 \lg(I/F), \quad (1)$$

式中, I 为通道后向散射亮度, F 为相同通道的太阳辐照度。

TOU臭氧总量反演模式包括4个部分: 快速正演模式、表面特性计算、臭氧总量初估值计算和臭氧总量精确值计算, 具体方法在文献18中有详细描述。

1.2 吸收性气溶胶反演原理

吸收性气溶胶反演基于如下紫外吸收性气溶胶指数反演公式

$$AAI = -100 \lg \left\{ \left[\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} \right]_{meas} \right\} + 100 \lg \left\{ \left[\frac{I_{\lambda_1}(A_{LER_{\lambda_1}})}{I_{\lambda_2}(A_{LER_{\lambda_2}})} \right]_{calc} \right\}, \quad (2)$$

式中, AAI为吸收性气溶胶指数, A_{LER} 为地表反照率, I 为强度值, λ 为波长, 下标 $meas$ 表示卫星测量值, 下标 $calc$ 表示模型计算值。基于辐射传输模型, 通过改变地表反照率($A_{LER_{\lambda_1}}$)计算获得波段 λ_1 的多个模拟观测值($I_{\lambda_1, calc}$), 将这些模拟观测值与 λ_1 的卫星量测值($I_{\lambda_1, meas}$)进行比较, 找到最接近于 $I_{\lambda_1, meas}$ 的 $I_{\lambda_1, calc}$ 所对应的 $A_{LER_{\lambda_1}}$ (此时 $I_{\lambda_1, meas} \approx I_{\lambda_1, calc}$)。由于 λ_1 波段的模拟值与观测值相等, 因此式(2)可以简化为

$$AAI = 100 \times \lg \left\{ \frac{I_{\lambda_2, meas}}{I_{\lambda_2}(A_{LER_{\lambda_2}})_{calc}} \right\}. \quad (3)$$

由于地表同一地物在紫外波段的地表反照率差异较小, 可以认为 $A_{LER_{\lambda_2}} \approx A_{LER_{\lambda_1}}$ 。因此由式(3)可得, 基于模型利用 $A_{LER_{\lambda_2}}$ 求得 λ_2 观测模拟值, 将其与 λ_2 实测值相结合即可求得吸收性气溶胶指数AAI。

AAI可以较好地进行云、雪或冰等亮背景区域的吸收性气溶胶的监测。由于灰霾、沙尘等气溶胶污染事件的发生常伴随有云, 可见光学监测方法无法有效地将云与吸收性气溶胶进行区分, 因而不能很好地进行污染事件的追踪与监测。而吸收性气溶胶在紫外波段具有较大的吸收差异, 云在紫外波段有强烈的散射作用, 吸收差异则非常小。因此, AAI可以很好地地将云和吸收性气溶胶区别开, 避免多云和阴天等带来的监测影响, 从而较好地进行云区的灰霾、沙尘等污染

事件的监测。

AAI值的大小与大气中具有吸收作用的气溶胶含量相关，因此AAI不仅可以定性反映气溶胶的多少，还可以反映气溶胶吸收性的强弱，这对气溶胶类型有很好的指示作用，为气溶胶污染事件的来源分析提供监测数据。

2 FY-3/TOU数据监测结果

2.1 L1B 数据

基于紫外波段的交叉定标方法^[22]，本研究对TOU L1B数据与欧州空间管理局MetopB/GOME-2（图1）和美国NPP/OMPS（图2）对应数据进行在轨交叉比较分析。交叉定标方法主要分为轨道预报、像元时空匹配、观测几何匹配、均匀性匹配及光谱转换与匹配等。其中，通过计算每个像元的时间和地理位

置来进行时空匹配，两台仪器的像元时间差异小于5 min，像元空间位置差异小于0.5个像元（25 km，TOU空间分辨率为50 km）^[20]。比较结果表明，TOU探测数据与国际其他标准仪器的对应数据具有很好的线性相关性（ R^2 一般大于0.96）。如图1所示，TOU 312 nm、317 nm、322 nm、331 nm及360 nm的辐亮度数据与GOME-2对应波段的数据具有很好的线性相关性（ $R^2 > 0.98$ ）。此外，交叉定标方程的斜率位于0.93~1.06，且截距均较小，这表明两台仪器的探测响应非常一致。

TOU 308 nm、312 nm、317 nm、322 nm、331 nm及360 nm的辐亮度数据与OMPS对应波段的数据具有很好的线性相关（图2）。此外，交叉定标方程的斜率位于0.86~1.06，方程的截距均较小，这表明两台仪器的探测响应非常一致。

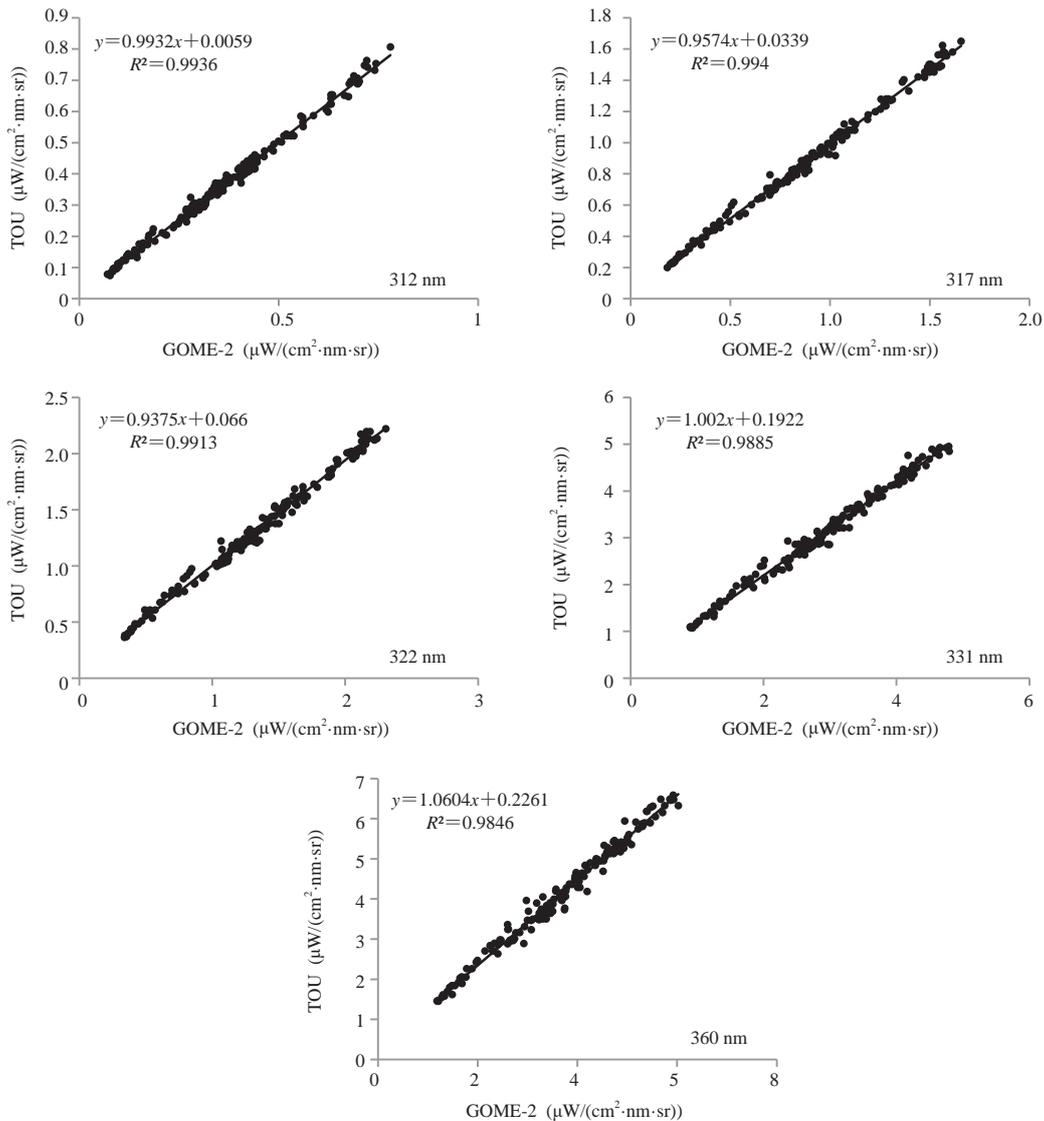


图1 TOU与GOME-2 L1B辐亮度数据交叉定标比较分析
Fig. 1 Inter-comparison of radiance between TOU and GOME-2

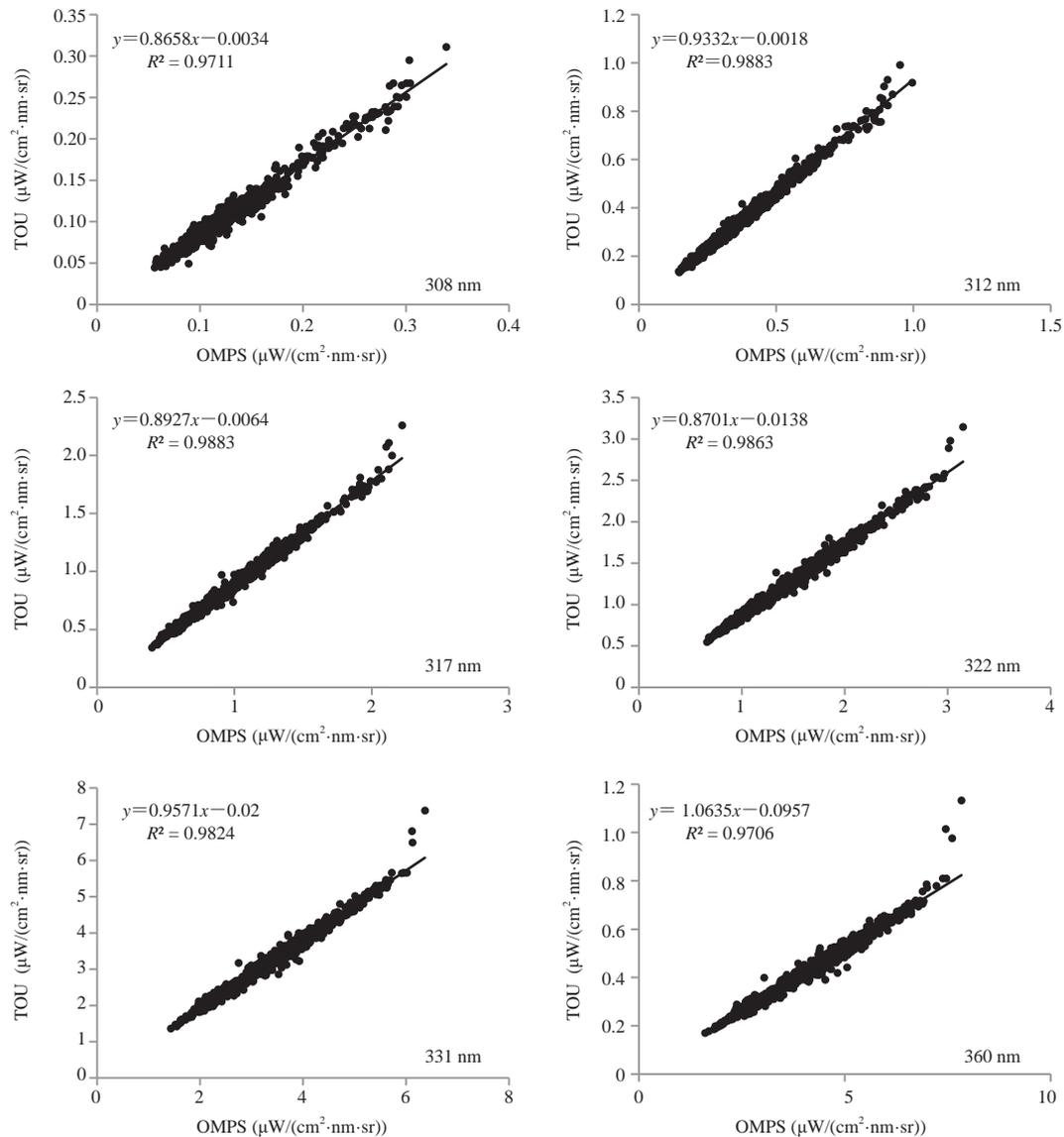


图2 TOU与OMPS L1B辐亮度数据交叉比较分析
Fig. 2 Inter-comparison of radiance between TOU and OMPS

2.2 臭氧监测

TOU通过臭氧总量来实现我国对全球大气臭氧分布的监测。因此,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与研究,尤其对南极及青藏高原等地区(图3)。图3为TOU 2008—2016年监测到的南极臭氧洞的年平均变化情况。可以看出,南极臭氧洞在2008—2011年较大,且没有明显的变化;2012和2013年,臭氧洞面积缩小很多;2014—2015年,臭氧洞面积扩大,且扩大面积较为明显;2016年,臭氧浓度增加,臭氧洞面积有所减小。

2.3 吸收性气溶胶监测

卫星AAI可以对连续空间分布的雾霾天气及其移动发展趋势进行监测,在空间覆盖方面具有优势,为

雾霾的产生、发展和消退等过程的研究提供实时大范围的观测数据。目前,紫外臭氧总量探测仪反演的AAI可以定性反映雾霾的强度分布情况,同时还有助于气溶胶类型的识别。

TOU是利用331和360 nm通道计算气溶胶指数,并以此进行灰霾、沙尘及生物质燃烧等吸收性气溶胶的监测。吸收性气溶胶指数能够将云、雪及冰等亮背景与吸收性气溶胶进行区分,较准确地进行灰霾和沙尘等的发生、发展和影响范围的遥感监测。

图4为2015年2月FY-3/TOU对我国灰霾进行连续空间范围变化监测的结果。由图可得,TOU可以很好地对我国北方地区产生的灰霾进行大范围的监测。

图5为2010年4月FY-3/TOU对我国沙尘型气溶胶

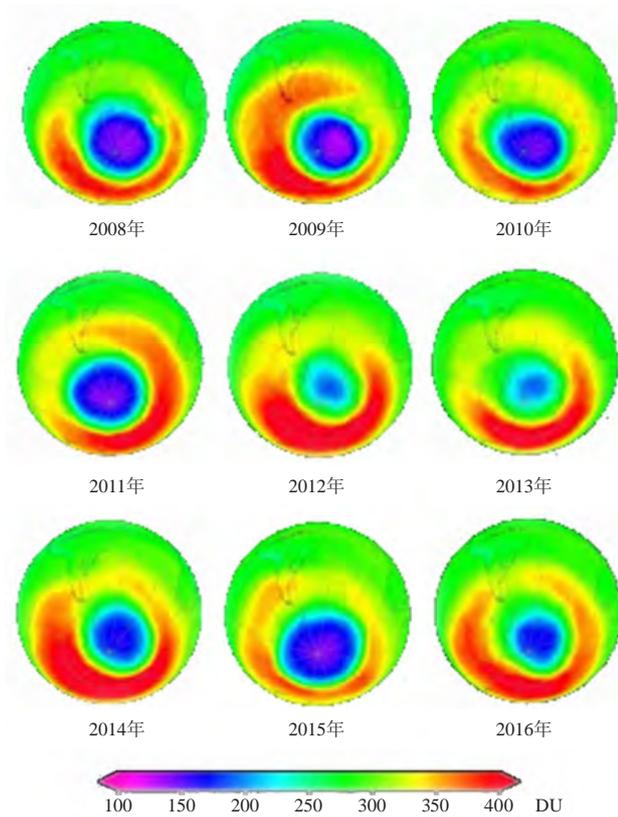


图3 FY-3卫星TOU南极地区臭氧总量监测(2008—2016年)
Fig. 3 Ozone measurements for Antarctic from 2008 to 2016 by FY-3/TOU

进行大范围连续空间变化监测的结果。由图可知，TOU可以很好地对沙尘分布等进行大范围监测。

3 结语

FY-3A/B/C卫星上搭载的TOU探测仪利用大气紫外后向散射进行全球臭氧总量的探测，自2008年，3台TOU已连续进行全球臭氧分布的特征监测，如南极臭氧洞和青藏高原等地区。TOU L1B辐亮度探测值与欧洲空间管理局仪器GOME-2和美国OMPS对应的L1B数据进行比较分析，它们之间具有很好的线性相关；而L2全球臭氧总量数据与美国仪器OMI的相对误差为2.52%，足以满足臭氧总量的探测要求。此外，2013年，基于TOU AAI成功实现了我国灰霾、沙尘等吸收性气溶胶污染事件的监测，并持续为我国大气环境监测和预报提供实时的监测数据。但TOU的波段仅为6个分离式通道，限制了其进行更多大气参数的探测。

FY-3/TOU AAI反演选择的波段为331和360 nm，它们将受到臭氧不同程度的吸收影响，这将导致反演获得的AAI产生一定的不确定性。此外，由于FY-3/TOU的空间分辨率为50 km×50 km，这不能很好地满足城市等人口密集区域的环境污染监测的要求。而且，TOU采用的是独立式多通道进行的探测，而不是采用连续的高光谱进行探测，这导致其不能应用于其他多种痕量气体（如SO₂、NO₂）的观测。因此，在今

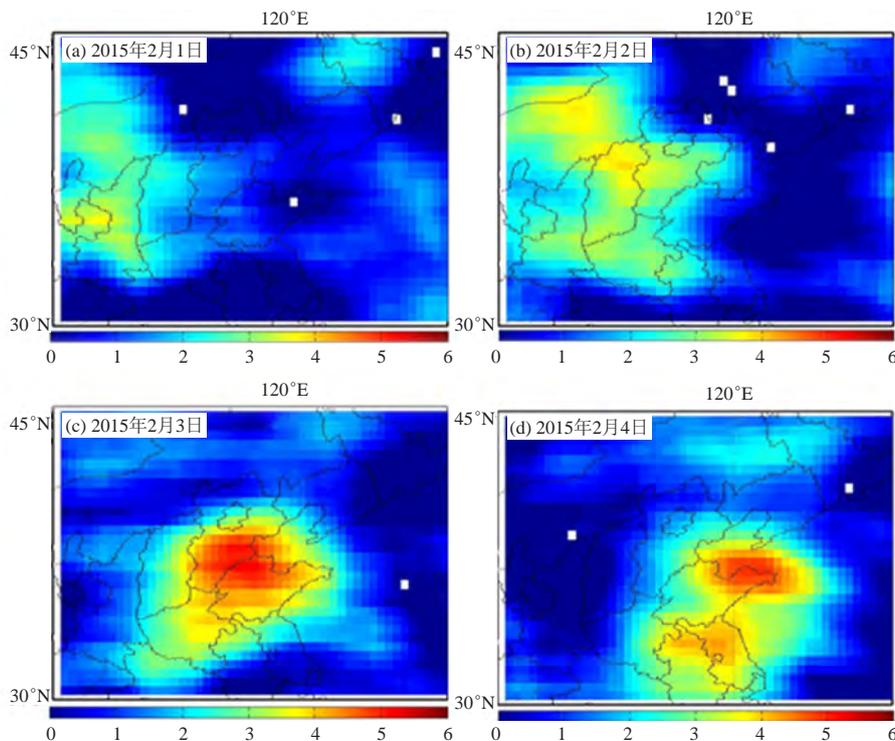


图4 紫外臭氧总量探测仪在我国华北地区的灰霾动态监测
Fig. 4 Smog observation from North China which were completed by using ultraviolet total ozone unit

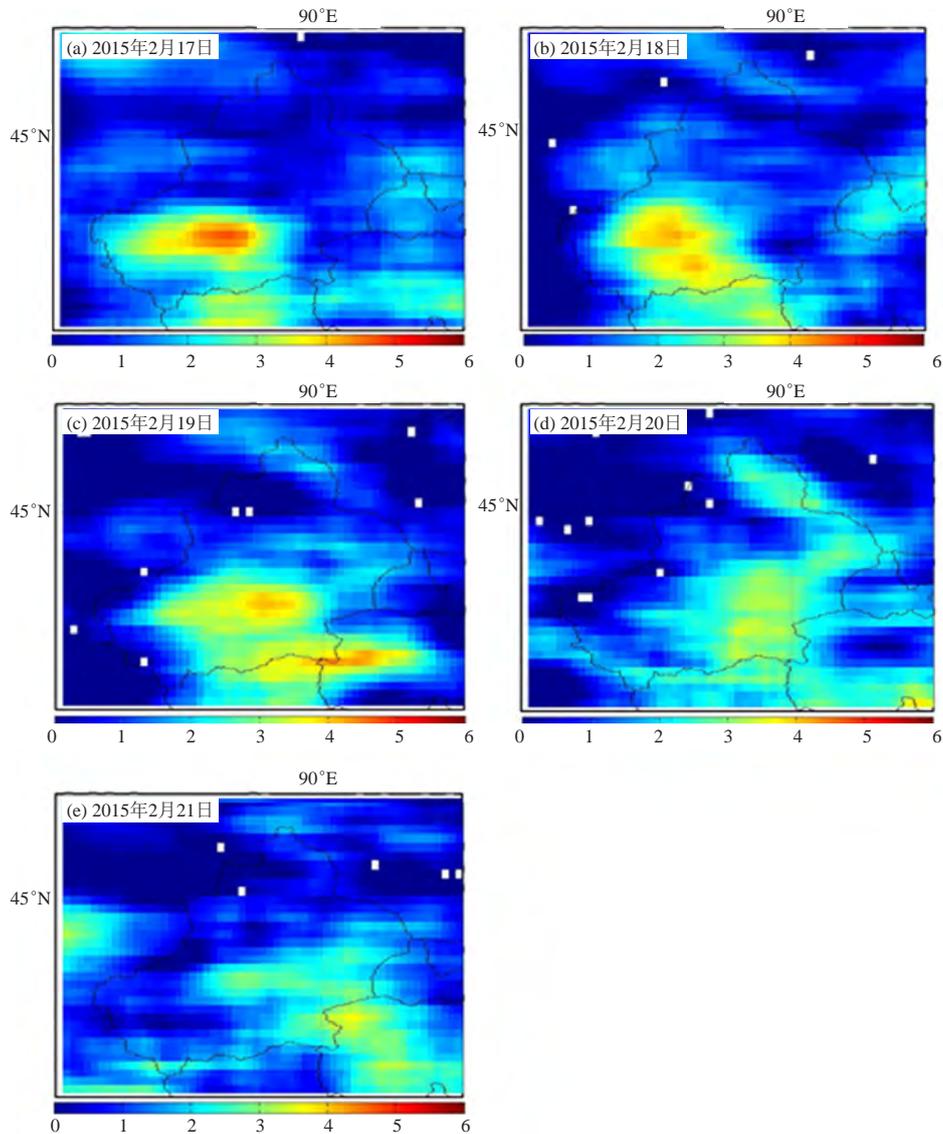


图5 2015年2月17日—21日紫外臭氧总量探测仪在我国西北新疆地区的沙尘动态监测

Fig. 5 Dust observation from northwest China using the ultraviolet Total Ozone Unit during 17–21 February 2015

后的仪器研制中，需要在波段的选取与扩展、空间分辨率的提高等方面进行改进。由于AAI的反演是基于两个不同波长对气溶胶吸收的差异，为了提高AAI的敏感性，波段选取应遵循以下原则：

- 1) 尽量避开臭氧吸收和Ring效应的影响；
- 2) 尽量避免波段间的地表反射率差异较大；
- 3) 有较强的辐射强度；
- 4) 可以兼顾与可见光气溶胶光学厚度的结合。

基于以上要求，综合考虑大气透过率在紫外波段的变化特性和太阳紫外后向散射辐射强度，在今后的仪器设计中，将采用紫外-可见光连续光谱的方式进行大气探测，光谱范围将覆盖紫外-短波可见光-近红外波段，以获得更多的大气反演参数，包括吸收性气溶

胶指数、气溶胶类型、气溶胶光学厚度及痕量气体，在分辨率的提高上主要分为以下几个方向：1) 光谱分辨率的提高，光谱分辨率将小于0.6 nm，可同时进行大气气溶胶相关参数和痕量气体的观测；2) 空间分辨率的提高，光谱分辨率满足气溶胶的探测需求，使得空间分辨率小于7 km；3) 光谱分辨率和空间分辨率的同时提高。

参考文献

- [1] 叶瑜, 李秀央, 陈坤, 等. 大气气溶胶光学厚度与大气污染物及气象因素关系的时间序列研究. 气候与环境研究, 2011, 16(2): 169-174.
- [2] 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.
- [3] Levelt P F, Van den O ord G H J, Dobber M R, et al. The ozone monitoring instrument. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2006, 44(5): 1093-1101.

- [4] Burrows J P, Mark Webber, Michel Buchwitz, et al. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission concept and first scientific results. *J Atmos Sci*, 1999, 56(2): 151-175.
- [5] M de Graaf, P Stammes, O Torres, et al. Absorbing Aerosol Index: Sensitivity analysis, application to GOME and comparison with TOMS. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, D01201.
- [6] Bovensmann H, J P Burrows, M Buchwitz, et al. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes. *J Atmos Sci*, 1999, 56(2): 127-150.
- [7] Remund Q P, D Newell, J V Rodriguez, et al. The Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS): On-orbit calibration design. *Proc SPIE*, 2004, 5652: 165-173.
- [8] Flynn L, C Long, X Wu, et al. Performance of the Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS) products. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 6181-6195.
- [9] Herman J R, P K Bhartia, O Torres, et al. Global distributions of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *J Geophys Res*, 1997, 102(D14), 16911-16922.
- [10] Torres O, P K Bhartia, J R Herman, et al. Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation, Theoretical Basis. *J Geophys Res*, 1998, 103, 17099-17110.
- [11] Torres O, P K Bhartia, J R Herman, et al. A long term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. *J Atm Sci*, 2002, 59, 398-413.
- [12] 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.
- [13] 刘利, 郑向东, 陈树, 等. 风云-3A卫星TOU臭氧总量地基对比研制分析. *空间科学学报*, 2015, 35(6): 696-706.
- [14] Wang W H, Zhang X Y, Wang Y M, et al. Introduction to the FY-3A Total Ozone Unit (FY-3A/TOU): Instrument, performance and results. *Int J Remote Sens*, 2011, 32(17): 4749-4758.
- [15] www.eumetsat.int/website/home/satellites/CurrentSatellites/Metop/MetopDesign/GOME2/index.html
- [16] 王飞, 刘毅, 蔡兆男, 等. 利用GOME-2卫星数据反演对流层臭氧. *遥感技术与应用*, 2016, 31(2): 316-323.
- [17] McPeters R D, Krueger A J, Bhartia P K, et al. *Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide*. 1993.
- [18] Bhartia P K. *OMI Algorithm Theoretical Basis Document, Volume II, NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, USA ATBD-OMI-02, Version 2.0*. 2002
- [19] Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, et al. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results. *J Atmos Sci*, 1999, 56(2): 151-175.
- [20] Eskes H J, van der A R J, Brinksma E J, et al. Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat. *Atmos Chem Phys*, 2005, 5(4): 4429-4475.
- [21] 王维和, 张兴赢, 安兴琴, 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.
- [22] 王后茂, 赵其昌, 胡秀清, 等. FY-3A/TOU与Metop-B/GOME-2在轨交叉定标检验分析. *光学学报*, 2017, 37(1): 128003-1-9.

(上接7页)



图1 Google展位

广泛关注, 美国乔治华盛顿大学的学者在这次会议上介绍了IBM量子计算的一些进展情况, 包括一些正在研究的算法及可供公众在量子设备上使用的开源软件包。

亚马逊公司的云服务在美国地球系统科学中得到了广泛应用, 大量地球数据信息都可以通过亚马逊的云系统存储和获取。在本次AGU会议上, 美国GMRT (The Global Multi-Resolution Topography Synthesis) 团队介绍了运行在亚马逊云上的全球多分辨率地形合成信息, 汇总了各种不同分辨率的陆地高程和海底测深数据, 且不断根据新的资料进行更新, 对地球科学研究有很高的应用价值。

结合以上介绍内容和我国下一步气象业务和科技发展情况, 提出以下参考建议。

1) 注意加强数据业务建设。无论是从科研还是业务需求角度看, 数据信息都成为越来越关键的环节, 需要加强总体设计、建设、管理、应用。在未来的建设发展中, 数据建设应独立于探测系统和计算网络系统, 尽管有相当大的关联性, 但仍有许多独立特征是需要单独考虑的, 应作为相对独立的业务功能发展。

2) 系统考虑卫星、雷达等遥感探测系统的业务建设。本次会议涉及气象小卫星、雷达卫星、相控阵雷达、激光雷达、云雷达等内容, 这些领域有些已比较成熟, 有些处于起步阶段, 我国也已开始有相关发展, 在未来的气象探测领域可能将发挥重要作用和影响, 需要予以关注, 并在我国的气象业务设计中统筹规划和发展。

3) 在业务科研与业务建设中注意气候系统各圈层相互影响问题。AGU会议将地球系统各领域的进展和成果放在一起交流, 本身就凸显了其相互间密切关联, 无论是地球系统、气候系统、生态系统、气候变化等问题, 都需要考虑各领域之间的相互作用和影响问题。如何把握好气象业务、科研的定位和拓展, 及与其他部门的合作, 需要做好系统的规划设计。

4) 关注人工智能技术的进展。智能技术如何在气象领域发挥作用, 需要一个探索和实践过程。但从目前的进展情况看, 在一些复杂、突变、不确定等问题的处理上确实可以发挥作用, 国内外都取得了相当多的成果, 应予以重视并加强在这一领域的设计和引导, 是发展智慧气象的重要途径。

(作者单位: 中国气象局)