科学通报 2010 年 第 55 卷 第 17 期：1726 ~ 1733
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

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

王维和[①②], 张兴赢[①②⑥*], 安兴琴[③], 张艳[①②], 黄富祥[①②], 王咏梅[④], 王英鉴[④], 张仲谋[④], 吕建工[④], 傅利平[④], 江芳[④], 刘国杨[⑤]

① 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;
② 国家卫星气象中心, 北京 100081;
③ 中国气象局大气成分观测与服务中心, 北京 100081;
④ 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190;
⑤ 中国空间技术研究院航天恒星科技股份有限公司, 北京 100086;
⑥ 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029
* 联系人, E-mail: zxy@cma.gov.cn

2009-12-03 收稿, 2010-03-17 接受
国家高技术研究发展计划(2008AA121703)、国家自然科学基金(40905056)、大气边界层物理和大气化学国家重点实验室基金(LAPC-KF-2008-11)、国家科技支撑计划重点项目(2008BAC34B04-2)、北京城市气象基金(UMRF200704)和国家重点基础研究发展计划(2005CB422202, 2006CB403702)资助

摘要 利用我国第二代极轨气象卫星“风云三号”搭载的紫外臭氧总量探测仪(TOU)发射后一年内获取的观测数据以及地基臭氧观测数据, 对全球特别是受到广泛关注的南极地区和青藏高原地区进行了臭氧总量反演试验, 反演结果与国外同类产品及地面观测结果进行了对比分析. 定性的分析结果表明, “风云三号”紫外臭氧探测仪反演的全球臭氧总量分布与国际上发布的同类产品相比, 真实地反映了臭氧随时间与空间的分布特征. 在全球部分地基观测站所处的位置上对臭氧总量探测仪与 OMI 产品和地基观测数据进行了比较, 结果表明, “风云三号”紫外臭氧探测仪臭氧总量反演结果和国外同类卫星产品相对均方根偏差约为 3%, 与地基观测结果相比相对均方根偏差约为 4.2%, 中低纬度地区均方根偏差小于高纬度地区, 最大均方根偏差出现在南极臭氧洞之内, 大多数情况小于 5%, 个别站点上超过 5%但低于 10%, 均优于 10%的产品设计指标. 目前 TOU 已经完成了在轨测试和试运行进入业务运行阶段, 向国内外用户提供实时臭氧总量产品.

关键词
紫外臭氧总量探测仪
大气臭氧总量
风云三号卫星
反演
真实性检验

臭氧是对生态、气候和环境有重要影响的大气微量气体[1]. 1985 年 Farman 等人[2~7]首次发现了南极臭氧洞, 之后在中国的青藏高原以及世界上其他高原地区又相继发现了很多微型的臭氧洞. 研究臭氧洞的成因和臭氧变化的机理需要高时空分辨率的臭氧监测资料. 早在 1924 年, 英国物理学家和气象学家 Dobson[8]就发明了利用直射太阳光测量大气臭氧含量的紫外光谱仪, 即 Dobson 仪器. 目前国际上很多地基臭氧观测站仍采用 Dobson 仪器观测大气臭氧总量, 臭氧总量的单位也以他的名字命名, 即 Dobson (DU)单位. 和地基臭氧观测仪器相比, 卫星臭氧探测仪在时空方面具有明显的优势, 使卫星臭氧探测成为监测全球臭氧变化的重要手段. 利用大气对太阳紫外线的后向散射反演大气臭氧总量是由 Dave 等人[9]在 20 世纪 60 年代提出的, 之后美国、欧洲相继发射了十几个紫外臭氧探测仪, 其中最早的是美国

英文版见: 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 Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-3240-2

的 TOMS 系列仪器[10,11], 分别搭载在美国的 NIMBUS-7(1978~1993 年)和 Earth Probe(EP, 1996~2004 年)、前苏联的 Meteor 3(1991~1994 年)卫星平台上. 于 2008 年 5 月 27 日发射的我国“风云三号”极轨气象卫星也搭载了我国第一台紫外臭氧总量探测仪(TOU), 该仪器与 TOMS 仪器具有类似的工作原理. 20 世纪 90 年代开始, 欧洲率先在 ERS-2 卫星臭氧探测器(GOME)[12] 和 Envisat 卫星差分吸收光谱仪(SCIAMACHY)[13]上使用了二极管列阵探测器, 而美国则在 AURA 卫星臭氧检测仪(OMI)[14]上使用了二维 CCD 探测器. 与 TOMS 仪器采用的光电倍增管探测器(PMT)相比, 列阵二极管探测器和 CCD 探测器具有更高的光谱分辨率, 除了可以探测臭氧外, 还可以探测大气中其他痕量气体如二氧化硫、二氧化氮等. 美国下一代臭氧探测仪器 OMPS 和我国新型臭氧探测仪将采用 CCD 探测技术.

采用 PMT 和 CCD 或二极管列阵技术的星载紫外臭氧探测仪的臭氧反演方法主要基于 Dave 等人[9]的理论, 其中 PMT 类型的仪器臭氧反演主要采用离散通道对法, 如 TOMS 系列仪器臭氧反演算法 TOMS_V7[15]和 TOMS_V8[16], 而使用 CCD 探测器或二极管列阵探测技术的仪器除了可以利用离散通道对算法外, 还可利用大气成分差分吸收光谱(DOAS)算法[16]反演臭氧总量和其他痕量气体总量. 本文介绍 TOU 的主要特性和反演算法, 分析了 TOU 在轨测试和试运行期间反演结果以及与 OMI 臭氧总量产品和地基观测的比较和误差分布特征, 对 2008 年南极臭氧洞全过程、2009 年青藏高原臭氧低值区监测结果进行了初步分析.

1 风云三号气象卫星臭氧总量探测仪介绍

1.1 风云三号卫星

风云三号极轨气象卫星 A 星[17](FY-3A)是中国第二代极轨气象卫星. 与第一代极轨气象卫星只搭载一台可见光红外扫描辐射计相比, FY-3A 卫星共搭载了包括紫外臭氧总量探测仪(TOU)在内的 11 个仪器, 光谱通道达百余个, 覆盖紫外、可见光、红外和微波波段, 除对大气温度、湿度进行三维立体观测外, 还可以检测云、雨、臭氧总量和臭氧垂直廓线、地表特征参数和空间粒子等. FY-3A 星卫轨道高度为 831 km, 道轨倾角为 98.81°, 白天自北向南绕地球运行. 卫星绕地球一周大约需要 102 min, 降交点地方时间约为 10 时 05 分, 回归周期约 5 d.

1.2 臭氧总量探测仪

紫外臭氧总量探测仪(TOU)[18]是一台采用固定光栅、狭缝阵列式 Ebert-Fastie 单光栅光谱仪, 探测器为光电倍增管, 通过波长选择调制器实现对探测波段的快速选取和探测信号、暗流的交替测量, 通过空间扫描系统成像. 紫外臭氧总量探测仪的科学目标是探测全球臭氧总量分布, 为大气化学、气候和环境监测提供臭氧分布参数. 从臭氧赫金斯吸收带(Huggins band)中选择 6 个波长, 测量大气后向散射和大气外界太阳辐照度, 从臭氧吸收系数差别显著的 2 个通道的后向散射辐射中提取臭氧吸收信息, 根据臭氧在两个波长上对紫外线吸收的差异与臭氧总量的关系定量反演大气臭氧总量. 表 1 为紫外臭氧总量探测仪光谱参数. TOU 通过空间扫描系统完成仪器在垂直于卫星轨道平面方向的对地扫描, 瞬间视场角为 3.6°, 相应的星下点地面分辨率为 52.6 km. 行扫描分 31 点完成, 扫描范围为±54°, 行扫描时间 8.16 s. 臭氧总量探测仪有 3 种观测模式: (1) 对地观测模式: 测量太阳后向散射强度; (2) 波长检测模式: 对波长漂移进行监测; (3) 辐射定标模式: 通过 3 块漫反射板测量太阳辐照度.

2 臭氧总量反演方法

TOU 臭氧总量反演模式是基于通道对算法开发的. 通道对算法的原理是, 臭氧吸收有明显差异的一对通道其紫外后向散射强度的差与臭氧总量之间存在密切关系, 基于这个关系可以获得臭氧总量. 美国的 NIMBUS-7/TOMS, AURA/OMI 的均采用这种算法反演臭氧总量, 即 TOMS V7[15]和 TOMS V8[16]. 相对于 TOMS V7, TOMS V8 的主要改进包括对流层气溶胶和水面太阳耀斑的订正, 臭氧和温度廓线气候数据的改进和正演模式的改进. TOMS V8 算法在正演

表 1 TOU 光谱特性

通道	中心波长	带宽
1	308.68±0.15	1+0.3, −0[a)]
2	312.59±0.15	1+0.3, −0 [a)]
3	317.61±0.15	1+0.3, −0 [a)]
4	322.40±0.15	1+0.3, −0 [a)]
5	331.31±0.15	1+0.3, −0 [a)]
6	360.11±0.25	1+0.3, −0 [a)]

a) 表明通道带宽在 1~1.3 nm 之间

辐射传输计算中对温度垂直分布和臭氧垂直分布廓线对臭氧总量反演的影响比 TOMS V7 算法考虑得更细致. TOU 发射前定标系数存在系统偏差, 忽略了在强信号与弱信号时线性度的差别, 通过在轨交叉定标生成新的定标系数代替发射前定标系数计算辐射强度. TOU 臭氧总量算法与 TOMS V7 基本类似, 但略有区别. 通过反演试验, 发现 TOU 不同的通道组合反演的臭氧总量与地基以及 OMI 产品的偏差随纬度带的分布规律是有差别的, 主要是原因是臭氧总量的反演精度主要取决于通道对之间的相对定标误差, 而通道对之间的相对定标误差与入射能量范围有关, 不同的纬度带紫外后向散射辐射能量是不同的. 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.

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

$$N = -100\lg(I/F), \tag{1}$$

其中 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.

快速正演模式: 是在精确辐射传输模式的基础上通过查算表实现的. 精确正演模式主要基于 Dave[19]的逐次迭代求解辐射传输方程理论开发的, 是考虑了 4 个 Stokes 参数的矢量辐射传输模式. 利用精确辐射传输模式计算了 26 条典型臭氧廓线和温度廓线、2 个高度层、10 个太阳天顶角和 6 个卫星观测天顶角下辐射传输方程中的辐射量并制成辐射查算表, 任意条件下的辐射传输计算通过插值实现.

表面特性计算: 表面特性包括有效云量、有效反射率及云顶和表面气压. 表面反射率和有效云量利用通道 6 计算, 因为通道 6 不受臭氧吸收的影响. 表面气压根据标准的地表高程数据计算, 云顶气压根据 ISCCP(international satellite cloud climatology project)云顶高度气候数据集计算. 在辐射传输计算中做了两条假设, 首先假设表面为各向同性的朗伯反射体, 其次假设表面反射率与波长无关. 表面特性在臭氧总量反演中引起的误差主要是因表面的非朗伯特性, 表面反射率随波长的变化, 云顶高度的变化产生的. 在无云和没有冰雪覆盖的情况下, 紫外波段下垫面的反射率很低, 而在臭氧反演中选取的通道对中两个波长的距离很近, 下垫面反射特性相近, 因此表面的非朗伯特性和反射率对波长的依赖产生的臭氧反演误差不大, 当臭氧总量在 240 DU 时误差一般在 3%以下[20]. 云对臭氧反演有一定的影响, 主要是由于云高计算的误差和云的非朗伯特性引起的, 对云和冰雪也会发生误判现象. 对流层中臭氧含量大约占大气臭氧柱总量的 10%左右, 平流层臭氧含量的变化对大气臭氧柱总量的变化起最主要的作用, 因此一般情况下云和表面特性对臭氧总量的反演的影响不超过 7.7%[20].

臭氧总量初估值的计算: 利用臭氧总量与通道对 *N*-值差之间的关系计算臭氧总量初估值. TOU 臭氧总量算法使用两个通道对计算臭氧总量初估值, 热带地区用 2~4 通道组合, 其余地区用 3~5 通道组合. 图 1 为臭氧总量与通道 3 和通道 5 *N*-值差的关系模拟计算结果, 大多数情况下非常接近线性.

精确臭氧总量计算: 将反演臭氧总量初估值的两个通道分别与通道 6 组合, 假设初估值与真实臭氧总量差别不大, 利用泰勒展开建立 3 个通道之间辐射值关系的方程组, 求解方程组即可获得精确的臭氧总量[15].

3 仪器运行状况、反演结果和真实性检验

利用 FY-3A 发射后半年的在轨测试期间以及随后的试运行期间获取的观测数据对仪器的性能变化进行了分析并进行了全球臭氧总量反演实验. 臭氧

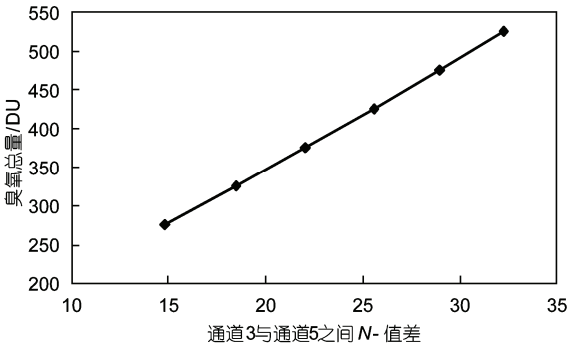


图 1 通道 3 和通道 5 *N*-值差与臭氧总量的关系模拟计算结果
大气模式为热带大气, 太阳天顶角为 27°, 卫星天顶角为 35°, 相对方位角为 45°

总量探测仪最重要的技术指标包括中心波长的稳定性、漫反射器的稳定性以及灵敏度. 在轨测试和试运行期间数据分析结果表明, TOU 的波长变化为–0.065 nm. 除了高纬度地区和南大西洋辐射异常带以外, 仪器的噪声小于 0.004 μW/(m^2·sr·nm). 3 块漫反射器中的盖板由于一直暴露在宇宙空间, 到 2008 年底已经衰减超过 30%, 但工作板和参考板均为发生明显的变化[17]. 卫星观测原始数据经定标、定位生成 L1 数据, 在 L1 数据基础上进行在轨定标修正后进行臭氧总量反演. 为了验证反演算法, 搜集了同时期内 AURA 卫星的 OMI 臭氧总量产品和国内外大部分可获取的地基臭氧观测数据, 通过对 FY-3A/TOU 全球臭氧总量反演结果的空间、时间和敏感地区的分布特征比较分析对臭氧总量反演算法进行了评估.

3.1 时空分布特征: 与国外同类产品的定性比较

大气臭氧空间分布特征主要表现在随纬度有明显的变化[21], 臭氧总量的极小值出现在赤道附近, 极大值在春季出现在纬度 60°附近. 图 2 为 FY-3A/TOU, AURA/OMI 和 METOP/GOME-2 仪器 2009 年 3 月 21 日全球臭氧分布监测图像. 从图像对比可以明显看出, 3 个星载仪器的监测结果均很好地反应了臭氧的空间分布特征, 臭氧总量空间分布呈现明显的纬度特征, 臭氧的最大值出现在北半球高纬度地区, 热带地区臭氧含量较低, 南半球的高纬度地区臭氧含量也较高, 3 月份南极地区因臭氧洞消失的时间不长臭氧含量仍较低. 从图像上看, FY-3A/TOU 与 METOP/GOME-2 更接近, 特别是在北半球高纬度臭氧高值区, 这是由于 FY-3A 与 METOP 的观测时间更为接近, 而 AURA 卫星与 FY-3A 观测时间相差 4 h 右.

每年的 9 月份开始, 南极地区的臭氧总量开始减少, 到 10 月份在南极大陆地区形成臭氧洞, 这期间南极地区的臭氧总量可降到 100 DU 甚至更低, 之后臭氧含量慢慢增加, 到年底臭氧洞才慢慢消失. FY-3A/TOU 在轨测试期间和试运行期间对南极臭氧洞进行了连续观测, 图 3 为 2008 年南极臭氧洞过程典型图像. 从 TOU 的南极臭氧洞图像可以看出, 从 8 月下旬开始南极臭氧已经开始降低, 南极大陆周边部分地区臭氧总量已经降到 220 DU 以下, 已达到臭氧洞标准; 到 9 月下旬臭氧洞的范围已经覆盖整个南极大陆以及周边地区, 在南极圈附近形成了一个臭氧总量最低为 100 DU 左右的臭氧洞; 9 月底臭氧洞继续增强, 臭氧总量为 100 DU 左右的地区大约占整个南极大陆的三分之二; 10 月中旬臭氧洞开始减弱, 11 月初继续变弱, 2009 年 1 月初恢复正常水平. TOU 的监测结果与近年来南极臭氧洞的变化规律比较一致, 成功地捕捉了臭氧洞的全过程.

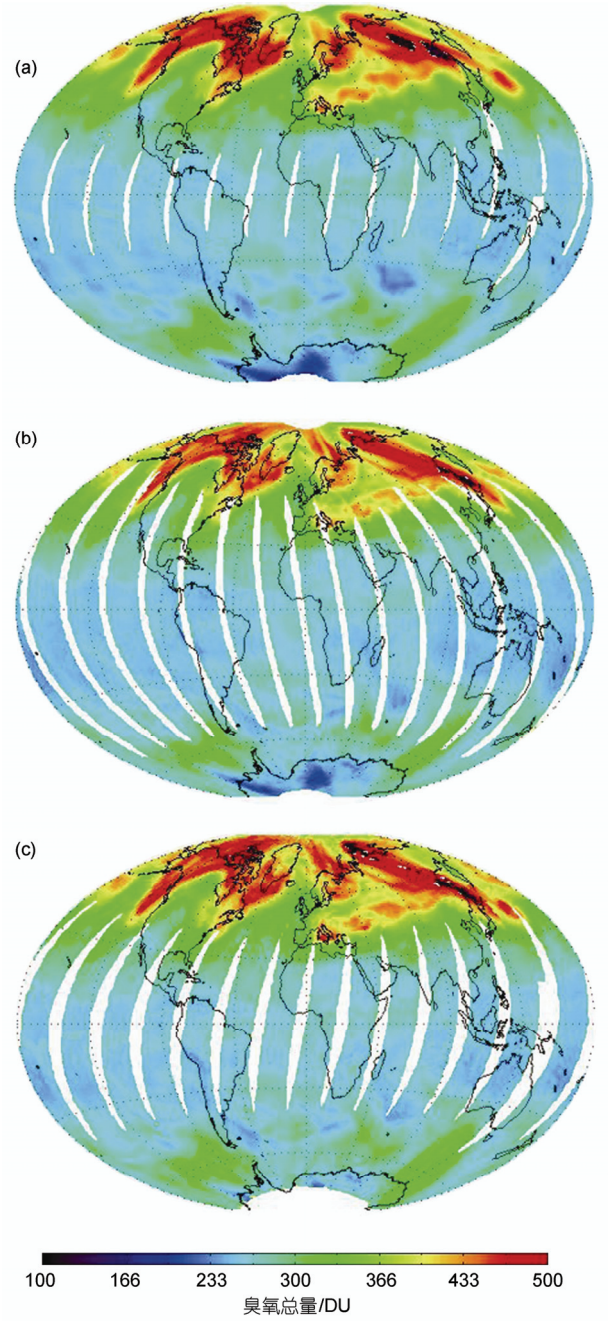


图 2 FY-3A/TOU(a), AURA/OMI(b), METOP/GOME-2(c) 全球臭氧总量分布图像

监测时间: 2009 年 3 月 21 日

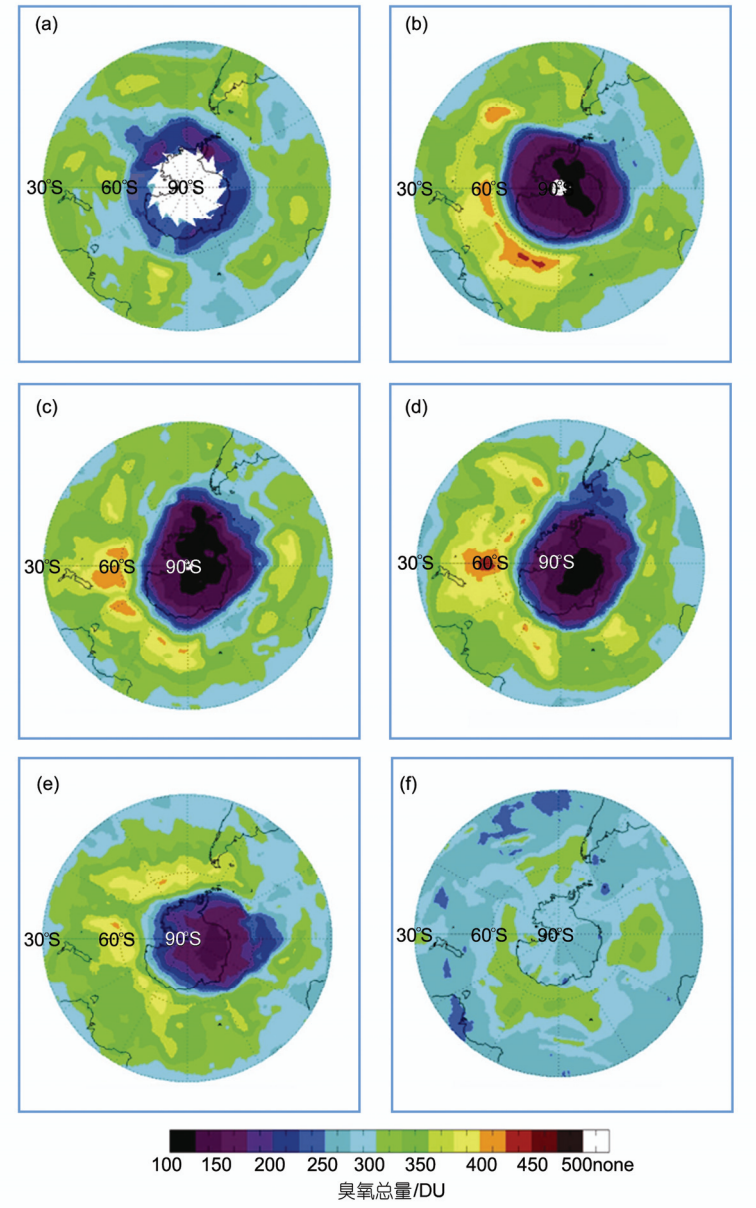


图 3 2008 年南极臭氧洞过程

(a) 2008 年 8 月 28 日; (b) 2008 年 9 月 26 日; (c) 2008 年 9 月 30 日; (d) 2008 年 10 月 8 日; (e) 2008 年 11 月 1 日; (f) 2009 年 1 月 4 日

3.2 青藏高原地区臭氧低值区监测结果

周秀骥等人[5]在 1995 年发现了在青藏高原地区出现一个明显的臭氧低值区, 该低值区每年的6月份出现, 一直持续到 9 月份, 10 月份以后低值区逐渐消失. 低值中心 6~10 月份臭氧总量月平均值与同纬度青藏高原其他地区相比大约低 10%左右, 其他月份相差 3%左右. 低值中心的臭氧总量低于 220 DU, 面积可达 200 多万平方千米. 与青藏高原微型臭氧洞类似的微型臭氧洞在其他地区也出现过[3,4], 一般认为形成的原因是对流层低臭氧浓度向平流层输送或者是热带大气向高纬度输送的结果, 而动力作用重新分配是臭氧低值区产生的主要原因[3~7]. FY-3A/TOU 对青藏高原地区 2009 年臭氧低值区进行了连续的监测, 10 月 4 日青藏高原出现了一个比同纬度明显偏低的臭氧低值区, 其中最低值臭氧总量接近 220 DU, 如图 4 所示.

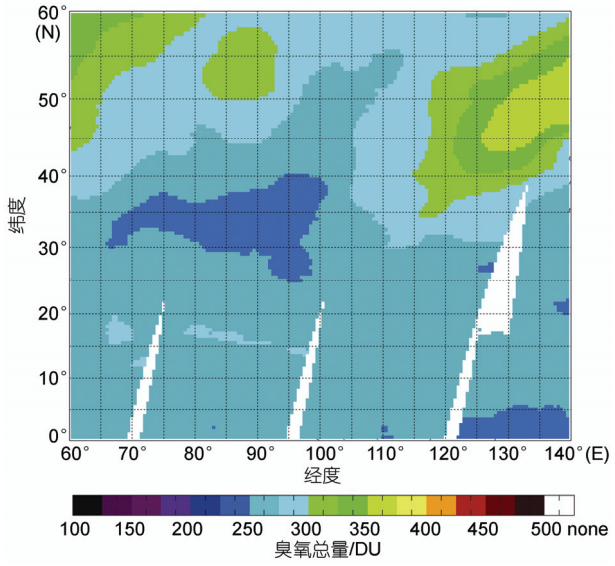


图 4　FY-3/TOU 2009 年 10 月 4 日青藏高原地区臭氧低值区监测结果

3.3　与地基观测、国外卫星反演结果的定量比较

图 5 给出了 2008 年 9~11 月南极臭氧洞形成期间全球部分站点地面观测的臭氧总量与 FY-3/TOU 和 AURA/OMI 反演的臭氧总量逐日对比结果. 图 5 中的站点分别位于北极附近、北半球中纬度地区、热带地区和南极圈内. 为了对 TOU 全球臭氧总量产品进行真实性检验, 选取了在轨测试和试运行期间可获取数据的大部分全球地基臭氧观测站数据, 分别与 TOU 和 OMI 观测结果进行对比. 逐日对比结果表明, FY-3/TOU 和 AURA/OMI 以及地基观测在 4 个纬度带呈现一致的变化趋势. 图 6 给出了用于 TOU 真实性检验的地基臭氧观测站分布图, 地基观测站基本上覆盖了全球大部分纬度带, 其中欧亚地区站点数目较多, 美洲和南极洲站点数据较少. 图 7 为 TOU, OMI 与 74 个臭氧观测站地基观测结果之间 3 个月内逐日臭氧总量相对偏差平均值随纬度的分布情况. 其中 TOU 与地基观测结果之间的平均相对偏差为 −0.96%, OMI 与地基观测结果之间的平均相对偏差为−0.60, TOU 与 OMI 之间平均相对偏差为 0.47%. 从相对偏差分布情况可以看出, 中低纬度地区以及北极附近卫星与地基观测之间的偏差均很小, 大部分在 2%之内, 南极地区个别站点卫星与地基观测相对偏差偏大, 最大可达 10%左右, 而卫星观测结果之

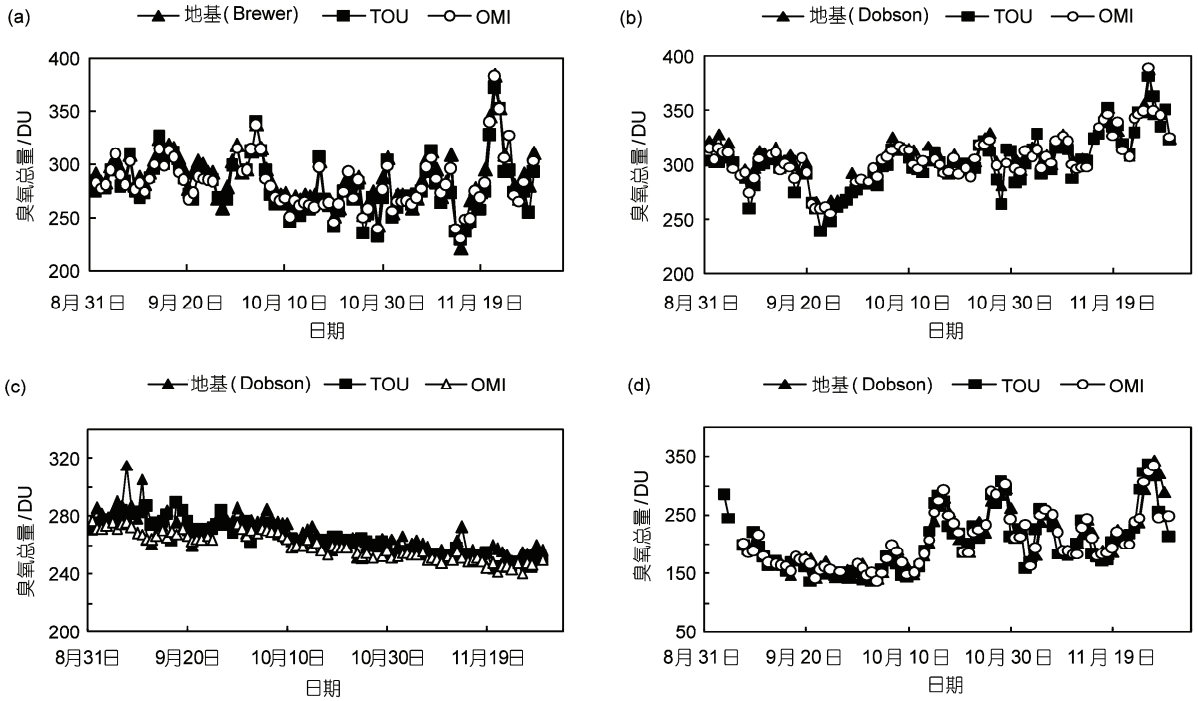


图 5　FY-3/TOU, AURA/OMI 反演的臭氧总量与地基观测结果的对比

2008 年 8~11 月. (a) LINDENBERG 观测站, 地理位置: 52.210°N, 14.120°E; (b) 香河观测站, 地理位置: 39.975°N, 116.37°E; (c) BANGKOK 观测站, 地理位置: 13.667°N, 100.612°E; (d) 位于南极的 ARRIVAL HEIGHTS/McMURDO 观测站, 地理位置: 77.830°S, 166.655°E

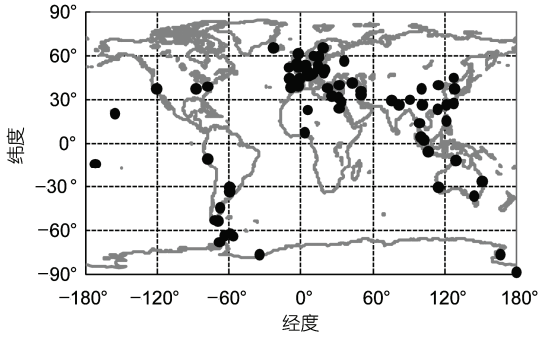


图 6 TOU 臭氧总量真实性检验选用的地基臭氧观测站分布图

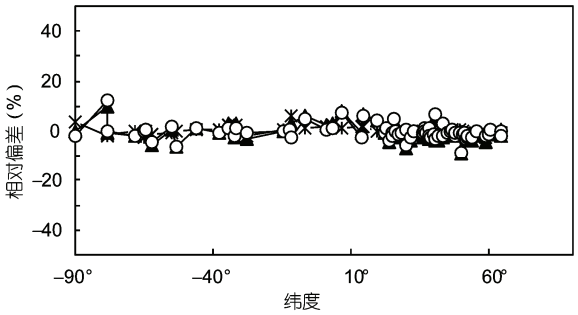


图 7 FY-3A/TOU, AURA/OMI 和地基观测之间在全球 74 个站点上的逐日臭氧总量相对偏差平均值

—✳— TOU 与OMI，—▲— TOU 与地基观测，—○— OMI 与地基观测．监测时间: 2008 年 8~11 月

间相对偏差在全部站点均在 2%之内. 在南极地区偏差较大可能的原因有 3 个: 第一是南极地区极昼期间臭氧含量较低, 卫星辐射定标的误差对反演结果影响较大; 另一个原因是地基观测通常是日平均结果, 而卫星观测则在瞬间完成; 第三个原因是卫星观测值代表的是像元内的平均值, 其中 TOU 像元的大小约为 50 km×50 km, OMI 像元约为 25 km×25 km, 而地基观测则仅代表一个位置, 高纬度地区臭氧变化的速度要高于中低纬度地区[21]. 地基观测与卫星观测相对偏差均方根随纬度的分布与相对偏差有类似

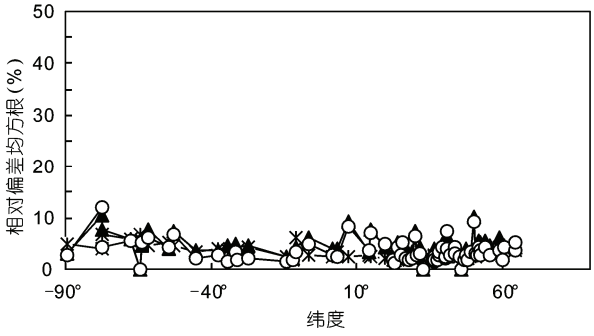


图 8 FY-3A/TOU, AURA/OMI 和地基观测之间在全球 74 个站点上的逐日臭氧总量相对偏差均方根平均值

—✳— TOU 与OMI，—▲— TOU 与地基观测，—○— OMI 与地基观测．监测时间: 2008 年 8~11 月

的特征, 如图 8 所示. 图 8 给出了全球 74 个地基观测站与 TOU 和 OMI 三个月内逐日观测结果之间相对偏差均方根随纬度分布情况. TOU 和 OMI 与地基观测相对偏差均方根平均值分别为 4.19%和 3.30%, TOU 与 OMI 相对偏差均方根为 3.01%. 与相对偏差分布类似, 中低纬度地区和北半球比南极地区偏小, 大部分在 5%之内, 南极地区个别站点卫星与地基观测相对偏差均方根超过 10%. 相对偏差均方根分布特征的原因与相对偏差分布的原因相同.

4 结论

风云三号紫外臭氧总量探测仪作为我国首次发射的实验型星载紫外臭氧观测仪器, 经过一年的在轨测试检验和试运行, 已经正式转入业务运行阶段. 试运行期间反演结果表明, 风云三号气象卫星紫外臭氧总量探测仪成功地实现了对全球臭氧总量分布, 特别是广为关注的南极地区和青藏高原地区臭氧异常变化的连续监测. 定性的监测结果与已有的研究结果相符, 初步的真实性检验证实了风云三号紫外臭氧总量探测仪全球臭氧总量的反演精度与国际同类卫星臭氧总量产品的精度相当.

致谢 在本项研究中多次与 NOAA/NESDIS 的 Lawrence. E. Flynn 博士、国家卫星气象中心的范天锡研究员和方宗义研究员进行讨论, 特此致谢.

参考文献

1 Keith P S. Atmospheric ozone and climate change. Ozone: Sci Engineer, 2001, 23: 429—435

2 Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. Nature, 1985,

315: 207—210
3 Werner R, Valev D, Atanassov A, et al. Ozone mini-hole observation over the Balkan Peninsula in March 2005. Adv Space Res, 2009, 43: 195—200
4 Jonson J E, Simpson D, Fagerli H, et al. Can we explain the trends in European ozone levels? Atmos Chem Phys, 2006, 6: 5166
5 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. 科学通报, 1995, 40: 1396—1398
6 Zou H. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet. Geophys Res Lett, 1996, 23: 1029—1032
7 卞建春, 王庚辰, 陈洪滨, 等. 2003 年 12 月青藏高原上空出现微型臭氧洞. 科学通报, 2006, 51: 606—609
8 Dobson G M B. 40 Years research on atmospheric ozone at Oxford-A history. Appl Opt, 1968, 7: 387—405
9 Dave J V, Mateer C L. A preliminary study on the possibility of estimating total atmospheric ozone from satellite measurements. J Atmos Sci, 1967, 24: 414—427
10 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
11 Mateer C L, Heath D F, Kreuger A J. Estimation of total ozone from satellite measurements of backscattered Earth radiance. J Atmos Sci, 1971, 28: 1307—1311
12 Bednarz F. The GOME Users Manual, European Space Agency Publication SP-1182, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands, 1995
13 Noël S, Bovensmann H, Wuttke M W, et al. Nadir, limb, and occultation measurements with SCIAMACHY. Adv Space Res, 2002, 29: 1819—1824
14 Levelt P F. OMI Algorithm Theoretical Basis Document, Volume I, Version 1.1. 2002
15 McPeters R D, Krueger A J, Bhartia P K, et al. Nimbus–7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. 1993
16 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
17 Dong C H, Yang J, Zhang W J, et al. An overview of a new chinese weather satellite FY-3A. Bull Amer Meteorol Soc, 2009, 90: 1531—1544
18 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
19 Dave J V. Meaning of successive iteration of the auxiliary equation of radiative transfer. Astrophys J, 1964, 140: 1292—1303
20 Fraser R S, Ahmad Z. The effect of surface reflection and clouds on the estimation of total ozone from satellite measurements. Kreins E R, ed. In: Fourth NASA Weather and Climate Program Science Review. NASA Conf Publ, 2076, 1978. 247—252
21 Stein M L. Spatial variation of total column ozone on a global scale. Ann Appl Statist, 2007, 1: 191—210