

中国 4 个地点地基与卫星臭氧 总量长期观测比较^{*}

郑向东 韦小丽

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要

对我国河北香河、云南昆明、青海瓦里关及黑龙江龙凤山地基观测臭氧总量与不同时期、不同卫星反演的产品差别特点进行比较, 评估地基和卫星观测臭氧总量数据的质量信息以及近 30 年来我国不同区域臭氧总量的变化趋势特征。结果表明: 4 个站点的地基与卫星观测臭氧总量的绝对和相对差别分别为 $-5 \sim 10$ DU 和 $-5\% \sim 4\%$; 日平均相对差别基本上呈现随机分布特征。TOMS 算法反演的卫星臭氧总量与地基差别总体上要优于与 DOAS 算法反演的同期产品。地基与卫星臭氧总量差别呈明显的区域特点, 可能反映了卫星反演计算中所需的臭氧、温度垂直分布等初始条件的纬度分布差异对卫星产品精度的影响。在过去 30 年, 4 个站点的臭氧总量在经历 1993 年前的显著降低后于 1995—1996 年逐渐回升, 而瓦里关站在 2001 年前后的回升更为明显。

关键词: 臭氧总量; 地基-卫星观测; 差别比较

引 言

地基和卫星观测是监测大气臭氧总量的重要平台。由于地基仪器易于维护和标定, 其臭氧总量数据的稳定性和延续性要优于卫星反演数据。地基观测作为检验卫星产品精度的重要手段已推动了卫星反演技术不断发展, 如 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrophotometer) 方法反演的臭氧总量产品已发展到 8.5 版本数据。但作为遥感型的地基光学仪器, 由于设计不同 (如选择测量的波长对不同或对杂散光处理上的差异等) 或其他原因, 它们观测的臭氧总量也有一定的不确定性, 这在 Brewer 和 Dobson 光谱仪在同一地点长达近 20 多年的观测中已有体现^[1]。此外, 如果单台 Brewer 或 Dobson 光谱仪运行时, 由于操作维护人员的变化, 甚至由于标定体系或观测环境的差异 (如云或等效臭氧层高度、温度的季节变化等) 在一定程度上也影响地基观测数据的精度^[2]。因此, 卫星数据也可以作为一个相对参考标准来评估地基臭氧数据的稳定性和精确度^[2-3]。

1978 年 Nimbus-7 卫星的 TOMS 和 SBUV (Scatter Backward Ultra-Violet) 仪器正式提供臭氧总量产品。在过去 30 年里, 随着卫星仪器设计技术的提高, 卫星臭氧总量观测仪器已经从固定波长狭缝型光谱观测转变到高分辨率紫外-可见光波段的连续光谱观测, 前者代表性的仪器是 TOMS 系列和 SBUV, 我国已经发射的风云三号卫星臭氧总量观测也是采取这种观测类型的仪器。后者包括了 GOME (Global Ozone Monitoring Experiment), SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography) 和 OMI (Ozone Monitoring Instrument)。在反演方法上, 也从不断改进的 TOMS 反演方法逐步过渡到 TOMS 和 DOAS 并存的局面^[4], 这两种方法均可以从 GOME, SCIAMACHY 和 OMI 原始光谱数据中反演臭氧总量产品。另外, 卫星遥测的臭氧总量更侧重于一个面上或区域的观测。卫星观测很少受到近地面或对流层低层天气的影响。对同一地区, 卫星臭氧总量数据产品在卫星正常业务运行期间的连续性要优于地基观测, 但卫星的更替或意外故障会使

* 国家自然科学基金项目 (40375005)、国家重点基础研究发展计划 (2010CB428605) 和中国气象局公益性行业专项 (GYHY200706038) 共同资助。

2009-05-14 收到, 2009-12-15 收到再改稿。

卫星数据的整体连续性受到影响,如卫星故障导致1993—1996年TOMS卫星遥测的臭氧总量出现空白。此外,对于一个固定的站点而言,卫星观测仪提供过境时的臭氧总量数据,而有的站点由于卫星过境轨道的差异或仅在星下点观测才有效等原因,几天、甚至十几天才观测1次有效数据,使卫星数据的连续性受到影响。

我国大陆地区分别从1979,1980年利用Dobson光谱仪正式在香河、昆明开展了臭氧总量观测^[5];20世纪90年代我国又在青海瓦里关、黑龙江龙凤山、浙江临安和南极中山站利用Brewer光谱仪开展臭氧总量及垂直分布的反演观测^[6-7],同时也在拉萨进行短期地基臭氧总量观测以验证青藏高原的“臭氧低谷”分布^[8]。香河、龙凤山处在东北亚高值臭氧区,瓦里关和昆明则处在西部及中低纬度地区的臭氧相对低值区。本文从统计角度比较分析这4个站点的长期地基与各卫星过境时臭氧总量间差别,包括这种差别对太阳天顶角或臭氧总量的依赖性检验,以了解卫星与地基臭氧总量数据质量信息。在此基础上,融合地基与卫星观测数据,进一步分析30年来我国这4个具有代表性地区臭氧总量变化趋势特点。

1 数据来源

本文采用卫星数据包括基于TOMS和DOAS两种方法反演的臭氧总量产品:① TOMS 8.0版本算法反演的N7(Nimbus-7,1979—1993年),M3(Meteorological-3,1991—1994年),EP(Earth Probe,1996—2002年)卫星臭氧总量数据;② TOMS 8.0版本算法反演的SBUV系列(1979—

2003年,包括在Nimbus-7的SBUV以及在NOAA系列的SBUV/2)卫星臭氧总量数据;③ TOMS 8.5版本算法反演的OMI(2004—2008年5月)臭氧总量;④ DOAS-TOGOMI(Total Ozone algorithm for GOME using the OMI algorithm)算法反演的GOME(1996—2007年)和SCIAMACHY(2002—2008年5月)卫星臭氧总量数据;⑤ DOAS算法反演的OMI数据(2004—2008年5月)。

TOMS 8.0版本臭氧总量误差约为2%^[9],SBUV 8.0版本数据的误差是根据具体探测器的卫星平台而定,测量精度总体上要低于TOMS^[10],而TOMS 8.5版本反演的OMI臭氧总量由于对云的处理采用实际测值,其误差为1%~2%,且与太阳天顶角的变化和气溶胶等因素有关^[11]。采用差分吸收原理TOGOMI反演的臭氧总量误差为2%~3%^[11-12]。

香河与昆明站点的地基臭氧总量数据分别来自于Dobson #075和#003光谱仪的观测数据。Dobson光谱仪测量臭氧总量精度一般为2%^[1]。这两台Dobson光谱仪校准是溯源于日本气象厅的Dobson #116的亚洲区域标准。

瓦里关和龙凤山站分别用Brewer #054和#076光谱仪观测臭氧总量,观测时间分别开始于1991年和1993年。长期观测中,通过定期与传递标准仪器Brewer #017进行校准以及仪器的自我检测来实现了数据的质量控制,保证了数据的准确性。图1是Brewer #054和#076的标定记录。从图1可以看出,1996年,两台仪器校准前相对差别比较大,这是由于Brewer光谱仪的NiSO₄UV晶体滤光片潮解而导致仪器灵敏度降低的缘故,同时仪器在最初运行过程中维护经验的缺乏也导致仪器测量精度下

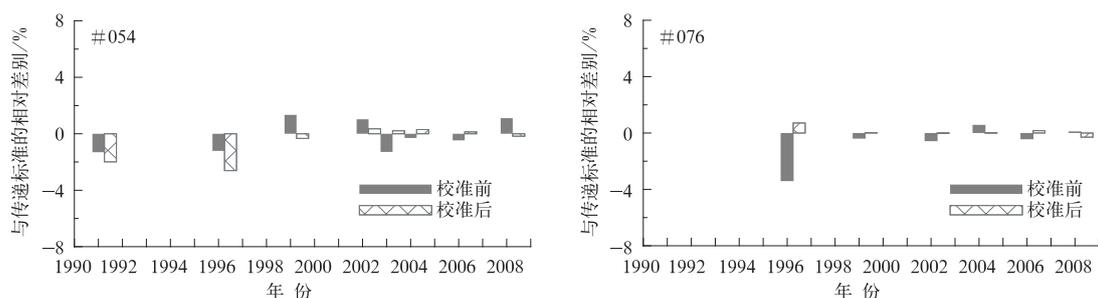


图1 Brewer #054和#076在1991—2008的校准记录

Fig. 1 Historical calibration record of Brewer #054 & #076 during 1991—2008

降。但以后的测量差别与标准传递仪器相比,基本上保持在 $\pm 1.5\%$ 的范围内。在 2000—2006 年 10 月, Brewer #076 观测的臭氧总量,由于衍射光栅出现擦痕导致仪器灵敏度在臭氧大气质量数大于 2.5 以上时明显下降,因此,本文在统计分析该时段的臭氧总量时对这种条件下的臭氧总量数据不予考虑。

2 结果分析

2.1 地基与卫星臭氧总量的绝对差别

地基与卫星臭氧总量的绝对差别在本文中定义为地基臭氧总量减去卫星臭氧总量,而相对差别则定义为绝对差别/地基臭氧总量 $\times 100\%$ 。表 1 给出了地基、星基臭氧总量在 4 个测点的绝对差别及其标准差,由表 1 可以看出,臭氧总量的绝对差别大致分布在 $-5.0\sim 10.0$ DU 范围内。TOMS_N7 和 SBUV 的卫星臭氧总量明显高于 Dobson 的测值, SBUV 的卫星臭氧总量也明显高于 Brewer 的测值。但其他 TOMS 反演的臭氧总量基本上要低于卫星臭氧总量测值。TOMS_EP, GOME 和 SCIAMACHY

CHY 臭氧总量在瓦里关山站点要明显高于 Brewer 测值,后两者平均要高 8~10 DU。

从表 1 可以看出,卫星与地基观测臭氧总量绝对差别存在两个特点:① 系统一致性特点,即同一种卫星仪器或平台测值的差别比较一致。如 TOMS_N7 和 SBUV 的臭氧总量高于地基测值; GOME 和 SCIAMACHY 的臭氧总量明显高于瓦里观测值;2002 年以后地基与卫星臭氧总量在香河存在 1 个明显的高值;而 DOAS 反演的臭氧总量与地基比较则明显偏大。② 区域性特点。与香河、龙凤山相比,臭氧总量绝对差别及其标准差在昆明和瓦里关比较小。这可能是昆明和瓦里关所处纬度较低,臭氧总量以及臭氧总量在短时间内变化(如天气时间尺度)也比较低的缘故。纬度较低,卫星观测时基本在太阳天顶角比较低的情况下完成,这在一定的程度上可能降低卫星遥测臭氧总量对太阳天顶角的依赖性;而臭氧总量低以及臭氧总量在短时间的变化(如天气时间尺度)比较小,也会使得两者臭氧总量差别对大气臭氧总量以及总量变化的依赖性明显降低。本文将进一步对由太阳天顶角或臭氧总量变化造成两者差别进行检验分析。

表 1 臭氧总量的地基与星基比较

Table 1 Total O₃ comparisons between ground-based and space observations

卫星名称	年份	香河		昆明		瓦里关		龙凤山	
		绝对差别±标准差/DU	样本数	绝对差别±标准差/DU	样本数	绝对差别±标准差/DU	样本数	绝对差别±标准差/DU	样本数
TOMS_N7	1979—1993	-3.3±8.9	3590	-1.3±7.2	2860	3.7±6.3	406		
TOMS_M3	1991—1994	2.5±10.0	396	1.6±8.6	317	4.9±7.1	378	2.3±12.4	156
TOMS_EP	1996—2002	2.2±7.8	1591	6.8±8.2	1277	-4.4±8.1	1481	0.41±10.7	1421
SBUV	1979—2003	-2.8±9.4	504	-0.57±7.1	338	-2.1±11.0	211	-3.7±12.7	203
OMI(8.5 版本)	2004—2008	7.7±14.8	913	7.0±5.9	817	0.14±5.3	1171	7.0±9.3	1004
GOME	1996—2003	4.1±12.8	963	3.4±7.8	691	-10.4±10.8	783	1.7±15.6	968
SCIAMACHY	2002—2008	6.0±18.4	457	0.53±7.2	346	-8.4±8.3	482	3.5±17.1	474
OMI(DOAS 版本)	2004—2008	8.8±19.7	895	7.0±5.9	803	0.8±11.1	1156	4.8±17.8	1009

2.2 地基与卫星臭氧总量的相对差别

在比较地基和卫星臭氧总量的相对差别之前,对所有卫星与地基臭氧总量的日相对差别数据进行统计筛选。筛选的规则是剔除相对差值大于总样本的标准偏差绝对值的 2.58 倍的样本(相当于保留概率分布图中积分面积为 99%的数据)。这样的筛选可以在一定程度上排除因臭氧总量的日变化(尤其是春季在香河与龙凤山两站)或其他未知原因导致两者比对出现异常情况。对于臭氧总量日变化, Allen 等^[13]的工作表明, TOMS 的臭氧总量在中、

高纬度地区因为天气过程所引起的日变化可达到 10%左右。但是,这种幅度的变化对以日平均尺度的地基与卫星臭氧总量的比较影响不大,且龙凤山站地基 Brewer 臭氧总量与卫星过境期间卫星臭氧总量日平均数据没有明显差异。

为了了解地基与卫星臭氧总量相对差别的统计特征,首先对相对差别是否符合正态分布进行检验。相对差别能否通过正态分布的检验可以说明两种类型数据的差别是否具有随机分布特点。如果具有随机分布特点,就意味着两者之间系统性差别可以不

考虑,如果不能通过检验则说明至少其中的一个观测平台出现系统性误差。根据文献[14],对4个站点地基与8种卫星臭氧总量之间的相对差别是否满足在0.05显著水平下遵从正态分布进行检验(表2),从表2可以看出,在香河,地基与OMI两个版本的臭氧总量相对差别没有通过正态分布检验,而在

昆明则是地基与OMI(8.5版本)以及GOME臭氧总量数据未通过正态分布检验。此外,即使通过了正态分布检验,地基与SBUV以及DOAS臭氧总量相对差别的偏度系数、峰度系数均明显偏高,说明即使满足一定条件的正态分布时,数据离散度仍比较大。

表2 地基与卫星臭氧总量相对差别正态分布特征的检验

Table 2 Normal distribution test for the relative differences of total ozone between space and ground-based observations

站点	卫星名称	统计样本数	峰度系数	$1.96 \times S_{g1}$	偏度系数	$1.96 \times S_{g2}$	正态分布检验
香河	TOMS_N7	3498	0.046	0.081	0.120	0.162	是
	TOMS_M3	386	0.151	0.242	0.120	0.479	是
	TOMS_EP	1557	0.188	0.121	0.173	0.242	是
	SBUV	494	0.074	0.215	0.138	0.426	是
	GOME	498	0.081	0.214	1.161	0.424	是
	SCIAMACHY	438	0.110	0.228	0.649	0.451	是
	OMI(8.5版本)	883	0.537	0.161	1.350	0.320	否
	OMI(DOAS版本)	871	0.375	0.162	0.627	0.323	否
昆明	TOMS_N7	2815	0.060	0.090	0.022	0.181	是
	TOMS_M3	311	0.052	0.270	0.097	0.532	是
	TOMS_EP	1235	0.394	0.136	0.129	0.272	是
	SBUV	330	0.019	0.262	0.010	0.517	是
	GOME	413	0.313	0.235	0.119	0.464	是
	SCIAMACHY	341	0.013	0.258	0.284	0.509	是
	OMI(8.5版本)	766	0.801	0.173	1.030	0.344	否
	OMI(DOAS版本)	781	0.475	0.171	0.329	0.340	是
瓦里关	TOMS_N7	199	0.351	0.335	0.402	0.656	是
	TOMS_M3	184	0.307	0.348	0.271	0.680	是
	TOMS_EP	1189	0.233	0.139	0.161	0.277	是
	SBUV	103	0.410	0.460	0.164	0.880	是
	GOME	368	0.549	0.248	0.970	0.490	否
	SCIAMACHY	247	0.439	0.302	0.276	0.593	是
	OMI(8.5版本)	574	0.285	0.199	0.029	0.396	是
	OMI(DOAS版本)	559	0.052	0.202	0.240	0.401	是
龙凤山	TOMS_M3	154	0.075	0.379	0.479	0.737	是
	TOMS_EP	1476	0.143	0.125	0.177	0.249	是
	SBUV	207	0.293	0.329	0.431	0.644	是
	GOME	976	0.133	0.153	0.521	0.305	是
	SCIAMACHY	462	0.058	0.222	0.290	0.440	是
	OMI(8.5版本)	987	0.321	0.152	0.191	0.303	是
OMI(DOAS版本)	989	0.063	0.152	0.238	0.303	是	

注: S_{g1} , S_{g2} 分别为峰度系数和偏度系数的均方差^[14]。

图2给出基于筛选后4个站点不同卫星与地基观测臭氧总量相对差别的月平均比较情况。从图2可以看出,卫星与地基臭氧总量的月平均相对差别在 $\pm 4\%$ 以内。TOMS_N7在香河与地基臭氧总量的差别变化很稳定,基本上为 $-4\% \sim 0$;而同期的昆明相对差别变化幅度约为 $-4\% \sim 2\%$,且1983, 1987年和1992年前后相对差值出现了明显的跳

跃。这些跳跃可能与仪器在不同时期的标定导致仪器参数的变化有关。SBUV由于仅给出星下点观测臭氧总量,代表性较其他卫星差,相对差别变化幅度为 $-4\% \sim 4\%$,此外,SBUV臭氧总量数据是不同时期多颗卫星观测数据的集合,不同时期差别的波动很明显。TOMS_EP和GOME臭氧总量在昆明要高于其他3个站点。

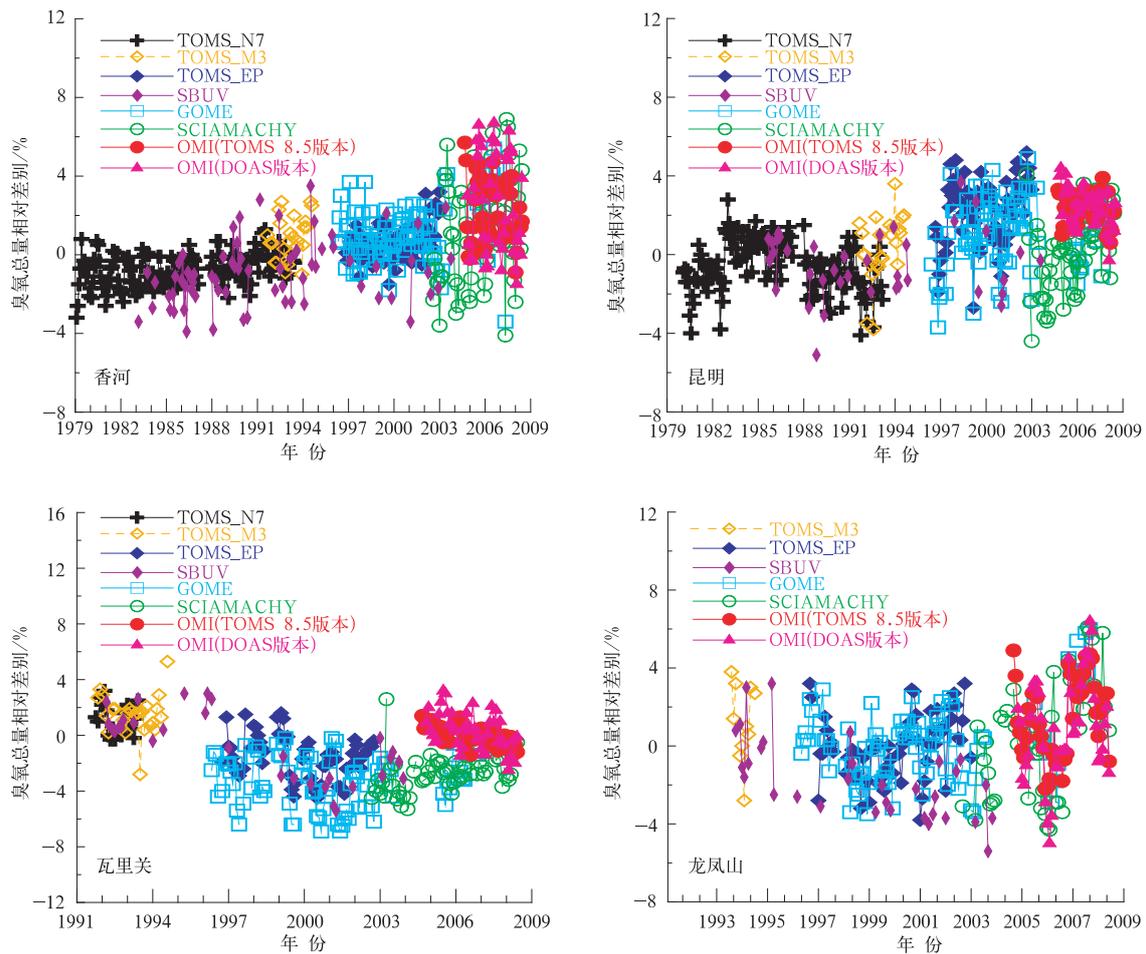


图 2 地基、星基臭氧总量月平均相对差别变化

Fig. 2 The monthly average of total ozone relative differences between ground and space-based observations

地基与星基之间的臭氧总量月平均相对差别季节变化在最近几年比较明显,特别是 SCIAMACHY 及 OMI(DOAS 版本)在香河、龙凤山两地,月平均相对差别变化幅度很大,与表 1 一致。两地处在高纬度地区,臭氧总量的季节变化较其他站点显著。昆明和瓦里关的月平均相对差别也有明显的季节变化,但变化幅度比较小。而香河、龙凤山的月平均相对差别有明显上升,尤其是香河已上升到 6%;龙凤山差别的回升主要在 2006 年下半年以后。

对于卫星臭氧总量精度,已有很多验证工作。其中卫星与地基臭氧总量之间的差别是否对太阳天顶角或臭氧总量(以地基臭氧总量为参考)有依赖性,是检验卫星臭氧总量准确性和稳定性的重要内容之一^[15],而对太阳天顶角的依赖性检验主要是针对在高纬度、极地地区的卫星反演产品进行检验^[16]。

图 3 给出了 4 个站点地基与各个卫星臭氧总量的相对差别对太阳天顶角的依赖性检验,太阳天顶

角选择的是卫星过观测点上空时的值。总体而言,上述 4 个站点相对差别与太阳天顶角的函数关系不是很明显,说明了由太阳天顶角所引起的卫星臭氧总量误差在卫星产品中已得到了很好的控制。

香河地基与 OMI 两个版本及 SCIAMACHY 的臭氧总量随着太阳天顶角的增大,相对差别呈明显降低趋势,幅度达到 6%左右;而与其他卫星产品比较则没有这种情形,这说明香河地基或卫星臭氧总量在 OMI 或 SCIAMACHY 卫星观测期间存在一个系统性误差。昆明地基与 TOMS_N7, SCIAMACHY 或 OMI(8.5 版本)产品的相对差别随太阳天顶角也有一定变化特点,但相对差别变化幅度分别为 1%~2%, -2%~2% 以及 1%~4%。在瓦里关,地基与 GOME 和 TOMS_EP 的相对差别随着太阳天顶角的增加有一上升趋势,总体幅度在 3%左右。而龙凤山在太阳天顶角为 50° 时出现一个分界点,当太阳天顶角大于此值时,地基与 DOAS

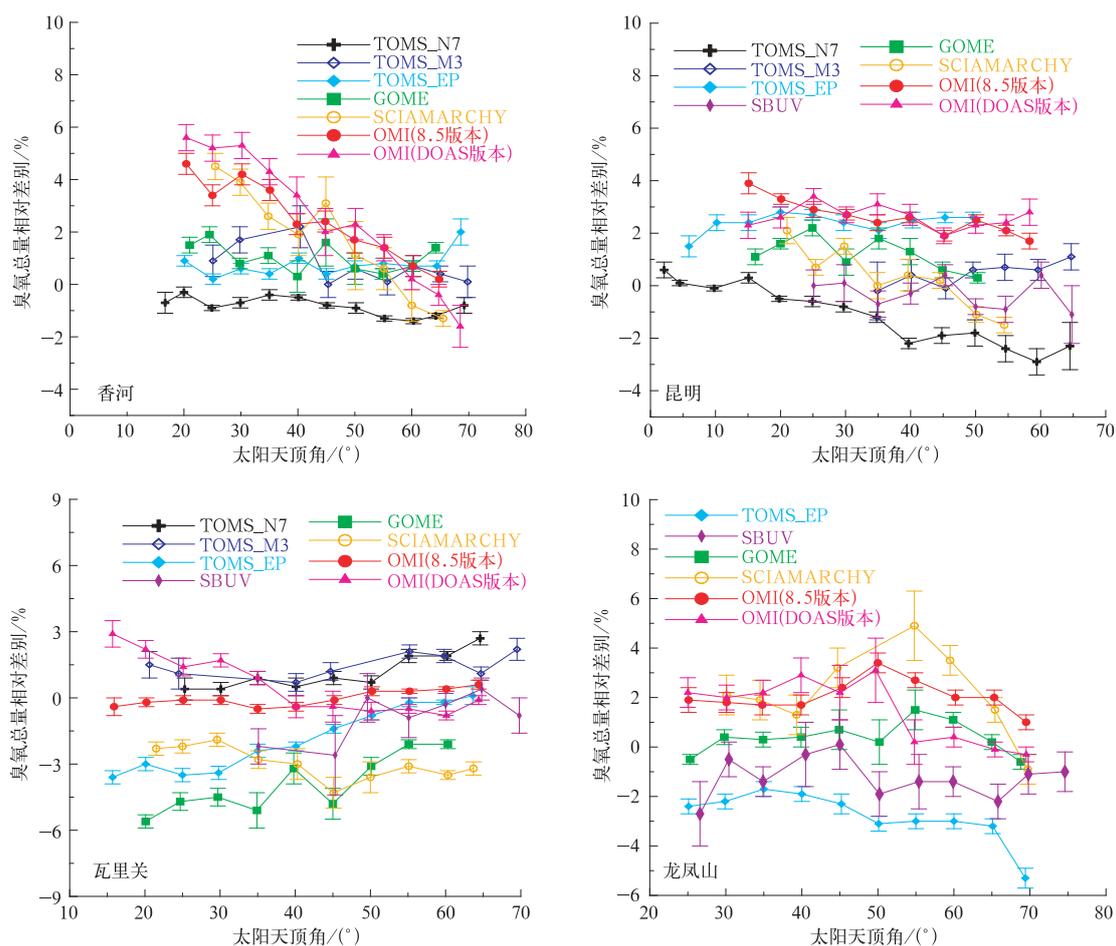


图3 地基、星基臭氧总量相对差别变化对太阳天顶角的依赖性检验

Fig. 3 The sensitivity tests of total ozone relative differences between ground and space-based observations to solar zenith angle

方法反演的臭氧总量相对差别随太阳天顶角呈下降趋势。

最理想情况是地基与卫星臭氧总量相对差别随太阳天顶角变化没有明显变化趋势。但从图3可以看出,除香河站的TOMS_N7表现出如此优越的性能外,其他不同地点还是呈现2%~6%的变化。造成这种变化的原因可能在于:地基仪器测量精度在某个时期发生了变化或者卫星产品精度出现问题。龙凤山站Brewer #076仪器在2002年下半年至2006年上半年期间,由于仪器光栅的擦痕导致在这时期的臭氧总量在太阳天顶角高时(大气质量数为2.2)比标准仪器的测值要低1%~2%。尽管这段时间臭氧总量经过订正,但从图3可以看出,当太阳天顶角高于50°时,地基与OMI和SCIAMACHY(对应光栅出现擦痕期间)卫星臭氧总量的相对差别降低趋势仍明显,而其他时段与TOMS_EP,SBUV

或GOME产品的这种趋势则不明显。

图4给出地基与卫星观测臭氧总量的相对差别对臭氧总量的依赖性检验。从图4可以看出,这种依赖性也呈现区域性特征。即香河和龙凤山两地的依赖性特征比较接近,而瓦里关和昆明两地的依赖性特征比较接近香河和龙凤山地基与OMI两个版本的臭氧总量相对差别随着臭氧总量增加而下降,下降幅度约为2%;瓦里关和昆明则是地基与GOME,SCIAMACHY和TOMS_EP臭氧总量的相对差别随着臭氧总量的增加而上升,上升幅度约为4%。此外,香河地基与TOMS_N7,TOMS_EP的相对差别、瓦里关地基与TOMS_N7,TOMS_OMI两个版本臭氧总量的相对差别与臭氧总量变化关系均不明显,说明这些卫星产品在控制因大气臭氧总量变化而导致测量误差这方面比较成功。

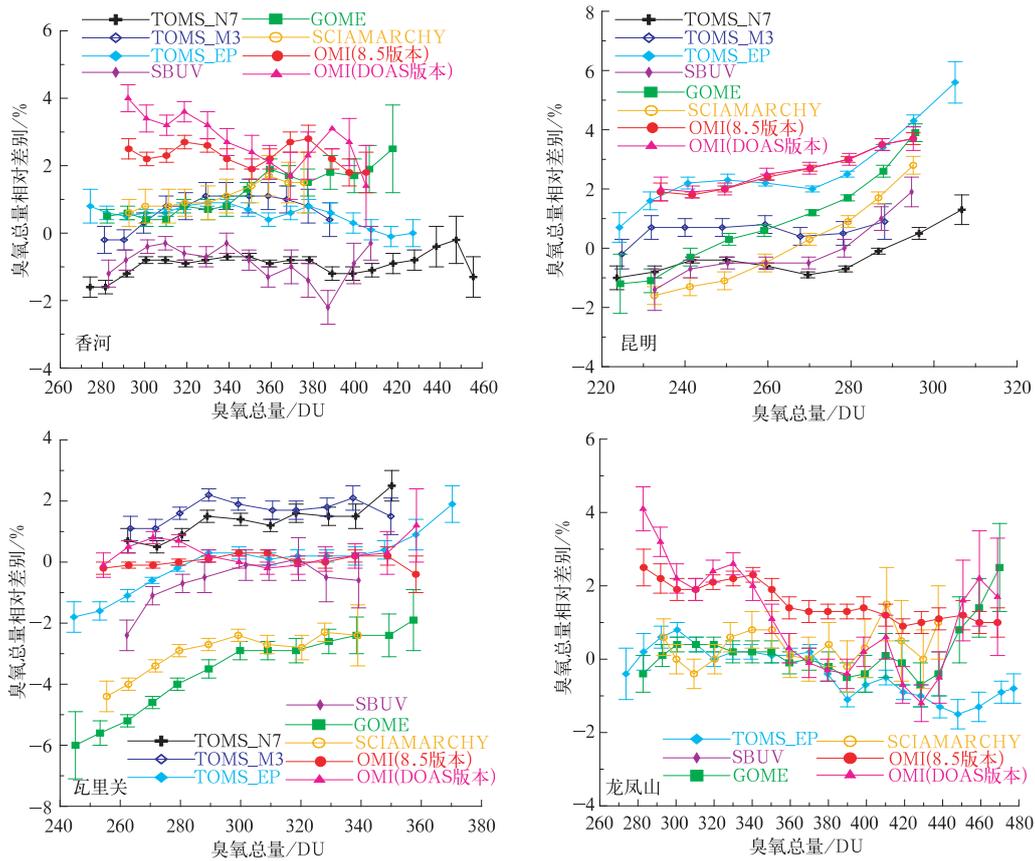


图 4 地基、卫星臭氧总量相对差别变化对臭氧总量(地基观测为基准)的依赖性检验

Fig. 4 The sensitivity tests of total ozone relative differences between ground and space-based observations to total ozone reference

2.3 臭氧总量的长期变化

分析臭氧总量长期变化,如果仅依靠地基观测数据,会面临因仪器标定或维修以及天气等多方面原因造成数据缺测而给统计分析结果带来影响;单纯依靠卫星臭氧总量又会碰到不同卫星之间存在的系统误差或卫星数据缺测(如 TOMS 系列在 1994—1996 年的缺测情况,2002 年以后因仪器问题,不建议作长期变化趋势的分析等)对统计特征的影响,由于上述原因导致 4 个站点臭氧总量长期变化特征趋势存在明显差异^[6]。

为构建比较完整反映臭氧总量长期变化的数据序列,本文以地基观测臭氧总量为参考,以地基和卫星臭氧总量比较所建立的线性回归关系来填补地基臭氧总量数据序列中的缺测部分。在前面地基与卫星观测相对差别比较中已注意到绝大部分的地基与卫星观测臭氧总量相对误差通过正态分布检验,两者的数据差别符合随机变量的分布特点,这为融合两种数据提供了统计上的可行性。表 3 给出 4 个地

点不同时期的地基与卫星观测臭氧总量之间的线性统计关系。由表 3 可见,地基与 TOMS 系列卫星臭氧总量数据的统计相关性要明显地高于与 DOAS 方法反演的数据产品,因此,依据表 3 中地基与 TOMS 系列卫星观测臭氧总量之间的统计关系,用 TOMS 系列卫星观测的臭氧总量数据填补地基臭氧总量数据序列中的缺测部分。而对于未能通过正态分布检验的比较,即不用 OMI 卫星进行融合。

本文利用计算相对简单的 RZ 方法开展滤波分析来提取臭氧总量数据长期变化特征^[17-19]。本文采用滤波周期是 $731 \times 3^{1/2}$ d(约 40 个月),这样可以过滤掉时间尺度为 3.5 年以上的过程(包括臭氧总量季节、年际变化以及准两周年振荡等)对臭氧总量长期变化特征的影响(图 5)。从图 5 可以看出,4 个站点的臭氧总量在不同时期均有一定的回升趋势,其中经历了 1993 年因皮纳图博火山爆发造成的全球臭氧总量低值以后的明显回升。全球尺度的臭氧总量在 1995—1996 年以后开始逐渐回升这一

表 3 卫星臭氧总量与地基臭氧总量线性拟合参数比较

Table 3 The parameters of linear fitting between total ozone of satellite and ground-based observations

卫星名称	香河			昆明			瓦里关			龙凤山		
	相关系数	斜率	截距	相关系数	斜率	截距	相关系数	斜率	截距	相关系数	斜率	截距
TOMS_N7	0.98	0.95	13.78	0.95	0.90	25.94	0.97	0.98	7.75			
TOMS_M3	0.97	0.97	11.97	0.93	0.90	27.52	0.97	0.98	11.00	0.98	0.93	27.28
TOMS_EP	0.98	0.96	14.61	0.94	0.96	16.12	0.96	0.93	15.97	0.98	0.93	25.59
SBUV	0.98	0.92	25.25	0.95	0.98	5.60	0.93	0.93	19.26	0.98	0.91	29.15
GOME	0.97	0.99	8.97	0.95	1.05	9.63	0.95*	1.00*	8.37*	0.97	0.94	20.56
SCIAMARCHY	0.94	0.94	26.77	0.94	1.07	16.95	0.97	0.98	1.83	0.96	0.95	19.19
OMI(8.5 版本)	0.96*	0.94*	28.66*	0.97*	1.02*	2.23*	0.98	0.99	4.08	0.98	0.96	20.37
OMI(DOAS 版本)	0.92*	0.84*	62.36*	0.92	0.94	21.75	0.95	0.87	38.61	0.97	0.88	46.57

注：* 表示两种臭氧总量之间的差别未能通过正态分布检验。

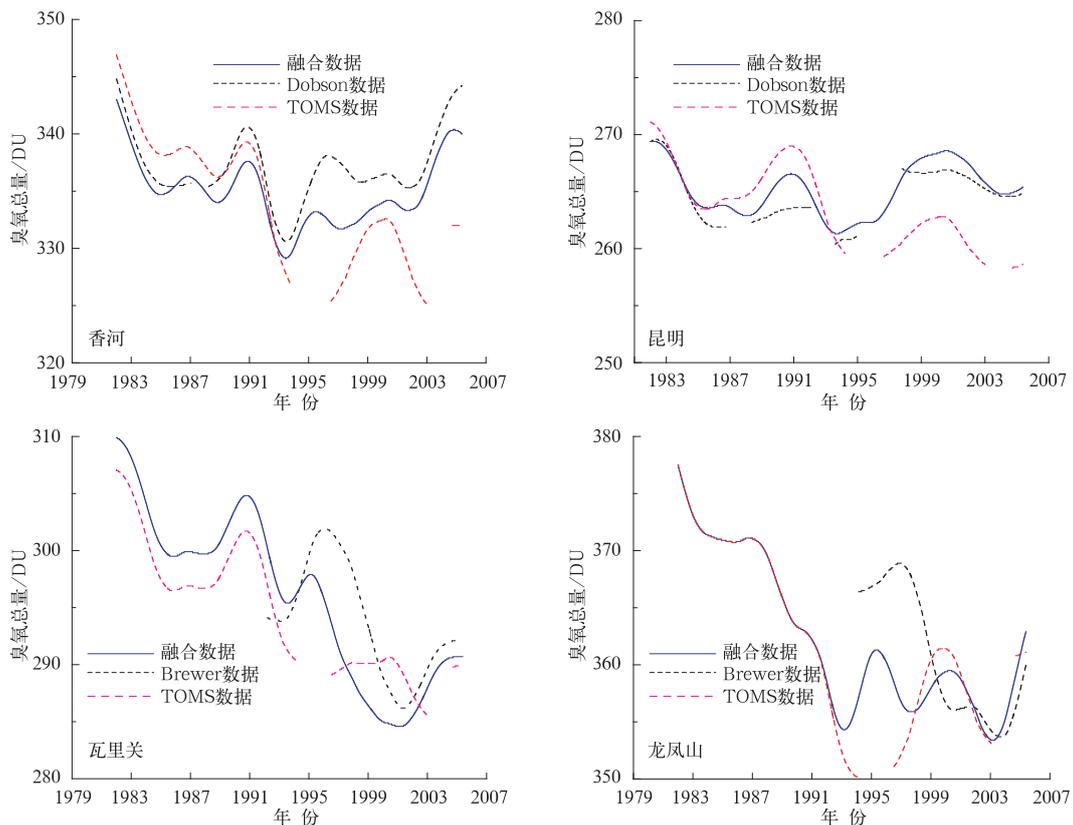


图 5 地基观测、TOMS 系列卫星和地基与 TOMS 融合的 3 种数据显示臭氧总量自 1978 年的变化趋势

Fig. 5 The total ozone trends since 1978 from 3 kinds data sets: ground-based, TOMS and integrated of ground-based and TOMS observations

信号在香河、昆明、龙凤山站点也比较明显^[20]。瓦里关臭氧总量的长期变化特点是个例外。30 年中,尽管在 1995 年前后有一个小的回升,但 1999—2003 年,瓦里关臭氧总量经历了近 30 年来最低值时期,造成这一原因还有待进一步研究。

从图 5 还可以看出,融合数据与非融合数据所表现出来的臭氧总量在过去 30 年内变化存在不同:

1997—2000 年瓦里关和龙凤山两站由于地基观测数据缺测较多导致了地基 Brewer 观测的臭氧总量上升幅度明显增大,且在时间相位上明显滞后。同样,由于 1994—1996 年 TOMS 系列卫星观测臭氧总量的缺测及 2002 年以后的数据不建议在长期趋势分析中应用的缘故,TOMS 产品反映臭氧总量在这两个时期的变化与融合或地基观测数据所反映的

趋势特征有明显差异。可见,地基与卫星观测结合才能比较有效地反映臭氧总量长期变化,而单独使用地基或卫星观测数据会因缺测造成混淆统计信号。

3 讨论与结论

我国华北—东北地区是臭氧总量高值区,而西南及青藏地区则是臭氧总量的低值区。卫星反演计算中所需臭氧、温度垂直分布等初始条件信息的纬度分布可能是导致本文地基与卫星臭氧总量差别显著区域性特点的原因之一。应该看到地基观测也有 1% 左右的相对误差^[1],这还不包括平流层有效臭氧层高度的温度季节变化对地基测量精度的影响^[21],也没有考虑到较高 SO₂ 使得城市地区的地基臭氧总量比实际值要高的事实也会对两者的比较结果有一定影响。但地基与卫星长期比较无疑反映了大气臭氧总量长期变化的特点,也反馈了地基观测数据的稳定信息^[3]。在龙凤山站,OMI 以及 SCIAMACHY 臭氧总量的相对差别在 2006 年下半年的抬升及其与太阳天顶角的关系与该地基 Brewer 光谱仪的运行状况是相符合的^[22],而 2004 年 8 月以来香河站的地基观测臭氧总量和 OMI 及 SCIAMACHY 的相对差别与太阳天顶角存在明显变化趋势上也需要进一步调查。

我国大陆地区 4 个站点的地基臭氧总量与绝大部分卫星臭氧总量日尺度上的相对差别基本上通过 0.05 显著水平的正态分布检验,这种差别在统计上的随机分布特点反映两种途径获取长期臭氧总量数据可靠性和稳定性。地基与卫星观测臭氧总量的绝对值差别为 -5~10 DU,相对差别为 -5%~4%。但总体上 TOMS 算法反演的卫星臭氧总量比 DOAS 算法的产品更接近地基观测结果。地基与卫星臭氧总量的差别呈现区域性特点,这在臭氧总量的相对差别对太阳天顶角或臭氧总量变化的依赖性方面也表现明显。综合地基和卫星臭氧总量的观测数据的趋势分析表明:过去 30 年中,我国 4 个站点地区的臭氧总量在经历 1993 年的显著降低后于 1995—1996 年逐渐回升,这与全球臭氧总量的回升基本一致,而瓦里关山站的显著回升则是在 2001 年以后。

致 谢:2003 年以前香河和昆明 Dobson 日平均臭氧总量数据由中国科学院大气物理研究所卞建春博士提供,之后的数

据从 WOUDC 下载;TOMS 臭氧总量数据从 jwocky. gsfc. nasa. gov 下载;GOME 臭氧总量由 Royal Netherlands Meteorological Institute(KNMI)提供。加拿大 IOS Ken Lamb 完成对 Brewer 光谱仪的 7 次标定工作。

参 考 文 献

- [1] Staehelin J, Kerr J, Evans R, et al. Comparison of Total Ozone Measurements of Dobson and Brewer Spectrophotometers and Recommended Transfer Functions. GAW/WMO Report Series, NO. 149, WMO/TD-No. 1214, Geneva: WMO, 2003.
- [2] Vanicek K. Differences between ground Dobson, Brewer and satellite TOMS-8, GOME-WFDOAS total ozone observations at Hradec Kralove, Czech. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6: 5163-5171.
- [3] Fioletov V, Kerr J, Hare E, et al. An assessment of the world ground-based total ozone network performance from the comparison with satellite data. *J Geophys Res*, 1999, 104: 1737-1748, doi:10.1029/1998JD100046.
- [4] Bramstedt K, Gleason J, Loyola D, et al. Comparison of total ozone from the satellite instruments GOME and TOMS with measurements from the Dobson network 1996—2000. *Atmos Chem Phys*, 2002, 2: 1131-1157.
- [5] 魏鼎文,赵廷亮,秦芳,等. 中国北京和昆明地区大气臭氧层异常变化. *科学通报*, 1994, 39(16):1509-1511.
- [6] 郑向东. 云对中国区域卫星观测臭氧总量精度影响的检验分析. *大气科学*, 2008, 32(6):1431-1444.
- [7] 张毅平,周秀骥,薛庆瑜. Brewer 光谱仪遥感大气臭氧垂直廓线的研究. *应用气象学报*, 1994, 5(4): 444-453.
- [8] 郑向东,汤洁,李维亮,等. 拉萨地区 1998 年夏季臭氧总量及垂直廓线的观测研究. *应用气象学报*, 2000, 11(2): 173-179.
- [9] Bhartia P K, Wellemeyer C. TOMS Version 8 Algorithm Theoretical Basis Document. <http://toms.gsfc.nasa.gov>, 2004:11-24.
- [10] Labow G J, McPeters R D, Bhartia P K. A comparison of TOMS & SBUV Version 8 Total Column Ozone Data With Data from Ground Stations//Zerefos C S. Proc of the Quadri Ozone Symp. University of Athens, 2004: 123-124.
- [11] Valks P, Veeffkind J P, de Haan J F, et al. TOGOMI Algorithm Theoretical Baseline Document. TOGOMI/KNMI/ATBD/001,2003.
- [12] Veeffkind J P, de Haan J F, Brinksma E J, et al. Total ozone from the ozone monitoring instrument (OMI) using the DOAS technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1239-1244.
- [13] Allen D R, Reck R A. Daily variations in TOMS total ozone date. *J Geophys Res*, 1996, 102(12): 13603-13608.
- [14] 任芝花,冯明农,张洪政,等. 自动与人工观测降雨量的差异及相关性. *应用气象学报*, 2007, 18(3): 358-364.
- [15] McPeters R D, Labow G J. An assessment of the accuracy of 14.5 years of Nimbus 7 TOMS Version 7 ozone data by com-

- parison with the Dobson network. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 3695-3698.
- [16] Lambert J C, Roozendaal M V, Simon P C, et al. Combined characterization of GOME and TOMS total ozone measurements from space using ground-based observations from the NDSC. *Adv Space Res*, 2000, 26: 1931-1940.
- [17] Meghan L M, Rao S T, Zurbenko I G. Evaluating the effectiveness of ozone management effort in the presence of meteorological variability. *J Air Waste Manage Assoc*, 1998, 48: 201-215.
- [18] Eskridge R E, Ku J Y, Rao S T, et al. Separating different scales of motion in time series of meteorological variables. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1997, 78(7): 1473-1483.
- [19] Casale G R, Meloni D, Miano S, et al. Solar UV-B irradiance and total ozone in Italy: Fluctuations and trends. *J Geophys Res*, 2000, 105(D4): 4895-4901.
- [20] Reinsel G C, Miller A J, Weatherhead E C, et al. Trend analysis of total ozone data for turnaround and dynamical contributions. *J Geophys Res*, 2005, 110, D16306, doi: 10.1029/2004JD004662.
- [21] Kerr J B. New methodology for deriving total ozone and other atmospheric variables from Brewer spectrophotometer direct sun spectra. *J Geophys Res*, 2002, 107(D23), 4731, doi: 10.1029/2001JD001227.
- [22] Ken Lamb. China Brewer #076 Calibrations Report in 2002, 2004 and 2006. <http://www.ios.ca>, 2009.

Long-term Total Ozone Comparisons Between Space-based and Ground-based Observations at 4 Sites in China

Zheng Xiangdong Wei Xiaoli

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The observed total ozone differences between ground-based data and available satellite products over Xianghe, Kunming, Waliguan and Longfengshan are analyzed. The absolute differences of total ozone between space-based and ground-based observations are $-5-10$ DU. And the relative differences (RD) is $-5\%-4\%$, fitting the normal distribution of 0.05 significance. Compared with the ground-based observation, the precision of TOMS (Total Ozone Mapping Spectrophotometer) version total ozone is better than that of DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy). Total ozone RDs are statistically similar at Xianghe and Longfengshan where total ozone is high, while the similarity of RDs are also detected at low total ozone region Kunming and Waliguan. The regional similarities also indicate in the sensitivity validations of total ozone RDs to the SZA (solar zenith angle) and total ozone references. The integrated total ozone dataset with the ground-based and TOMS as well as OMI observations in the 4 proxy sites also reflect the substantial depletion of global total ozone event around 1993. An eventual recover trend emerged in Xianghe, Kunming, and Longfengshan during 1995—1996, but the recover trend in Waliguan doesn't occur until 2001. The inter-comparisons also reveal the quality information of ground-based total ozone observations. For example, due to Brewer grating scratches in 2000—2006, total ozone observation from Longfengshan intends to be lower at high SZA conditions, which has been reflected in the RDs sensitivity validation to SZA. The increasing total ozone difference between Dobson #075 and OMI or SCIAMACHY products since 2007 needs further investigation.

Key words: total ozone; ground-based and space-based observation; difference comparison