

张金强, 王振会, 陈洪滨, 等. 2017. 地基与星载仪器观测大气臭氧总量分析 [J]. 气候与环境研究, 22 (2): 177–190. Zhang Jinqiang, Wang Zhenhui, Chen Hongbin, et al. 2017. Total ozone column derived from the ground-based and space-borne instruments [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (2): 177–190, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15263.

地基与星载仪器观测大气臭氧总量分析

张金强^{1,2,3} 王振会³ 陈洪滨^{1,3} 施红蓉¹

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所公共技术服务中心, 北京 100029

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 本文选取多个臭氧总量观测站点, 采用“三重制约法”分别对下列 3 组仪器观测臭氧总量数据进行统计分析, 解算出不同观测资料的误差标准差, 进而对比研究各种仪器的精度特征: 1) 1996~2003 年期间地基 WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) 观测网络仪器 (包括 Brewer、Dobson 和 Filter 臭氧测量仪) 与星载 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 和 GOME (The Global Ozone Monitoring Experiment) 仪器; 2) 2004~2013 年期间 WOUDC 与星载 OMI (ozone monitoring instrument) 和 SCIAMACHY (scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography) 仪器; 3) 2004~2013 年期间地基 SAOZ (Système D'Analyse par Observations Zénithales) 与星载 OMI 和 SCIAMACHY 仪器。结果表明, 1996~2003 年期间 TOMS V8 和 GOME 观测精度相当, 分别为 7.6 ± 2.8 DU/46 (其中, 7.6 ± 2.8 DU 为所分析站点观测资料的平均精度及其标准差, 46 为站点数目) 和 7.6 ± 1.5 DU/46。TOMS V8 观测精度优于 TOMS V7 (8.5 ± 3.0 DU/46), 验证了前者对后者有所改进。2004~2013 年期间 OMI 和 SCIAMACHY 在 WOUDC 地基站点观测精度接近, 分别为 6.6 ± 1.4 DU/21 和 6.0 ± 1.6 DU/21。SAOZ 地基仪器精度为 8.4 ± 3.6 DU/8。对于 3 类 WOUDC 地基仪器, Brewer 站点观测资料的平均精度最优 (7.9 ± 3.3 DU/12), Dobson 次之 (8.7 ± 2.3 DU/19), Filter 最差 (14.7 ± 4.0 DU/15)。相比于卫星, 3 种地面仪器观测平均精度较差 (10.5 ± 4.3 DU/46), 这主要是由于 Filter 精度较差引起。中国境内的瓦里关 (Brewer)、香河 (Dobson) 和昆明 (Dobson) 3 个地基站点仪器观测精度均较优, 分别为 7.8 DU、6.7 DU 和 6.6 DU。尽管不同站点之间存在一定差异, 但整体来说, 地基与卫星仪器在中国境内 3 个站点观测臭氧总量吻合较好。

关键词 臭氧总量 地基 卫星 精度 三重制约法

文章编号 1006-9585 (2017) 02-0177-14

中图分类号 P41

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15263

Total Ozone Column Derived from the Ground-Based and Space-Borne Instruments

ZHANG Jinqiang^{1,2,3}, WANG Zhenhui³, CHEN Hongbin^{1,3}, and SHI Hongrong¹

1 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Center of Technical Support and Service, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2015-11-24; 网络预出版日期 2016-11-04

作者简介 张金强, 男, 1981 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事大气环境探测研究。E-mail: zjq@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41275039、61327810、91337214

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41275039, 61327810, and 91337214)

Abstract The collocated total ozone columns derived from three groups of instruments were analyzed at multiple surface stations in this study. The three groups of instruments are: 1) Ground-based WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) network instruments (including Brewer, Dobson, and Filter), space-borne TOMS (Total Ozone Mapping Spectrophotometer) and GOME (The Global Ozone Monitoring Experiment) between 1996 and 2003; 2) WOUDC instrument, space-borne OMI (ozone monitoring instrument) and SCIAMACHY (scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography) from 2004 to 2013; 3) ground-based SAOZ (Système D'Analyse par Observations Zénithales), space-borne OMI and SCIAMACHY during 2004–2013. The triple control method was adopted to calculate standard deviations of errors of different kinds of datasets and a comparison of their precisions was conducted. Results show that the precisions of TOMS V8 and GOME, which were 7.6 ± 2.8 DU/46 (7.6 ± 2.8 DU denoted the mean precision and its standard deviation of the ground sites analyzed; 46 represented the number of the sites) and 7.6 ± 1.5 DU/46, respectively, agreed well during 1996–2003. The precision of TOMS V8 was better than that of TOMS V7 (8.5 ± 3.0 DU/46) and the improvement was confirmed in this study. The precisions of OMI and SCIAMACHY, which were 6.6 ± 1.4 DU/21 and 6.0 ± 1.6 DU/21, respectively over WOUDC sites during 2004–2013, were close to each other. The precision of SAOZ was 8.4 ± 3.6 DU/8. In terms of the WOUDC ground-based instruments, the average precision of Brewer was the best (7.9 ± 3.3 DU/12), followed by that of Dobson (8.7 ± 2.3 DU/19), and the worst was that of Filter (14.7 ± 4.0 DU/15). The mean precision of the above three kinds of ground-based measurements (10.5 ± 4.3 DU/46) was worse than that from the space-born instruments due to the application of the Filter-type instrument. With regard to only the ground-based instruments in China, their precisions were excellent at Waliguan (Brewer), Xianghe (Dobson), and Kunming (Dobson) sites, which were 7.8 DU, 6.7 DU, and 6.6 DU, respectively. Although there existed certain differences at Waliguan, Xianghe, and Kunming sites, the total ozone column obtained by the ground-based and space-borne instruments generally agreed well over these three sites.

Keywords Total ozone column, Surface, Satellite, Precision, Triple control method

1 引言

大气臭氧变化在全球气候和环境具有重要作用,是当今大气科学领域的重要研究对象之一(周秀骥等, 1995; Von Der Gathen et al., 1995)。要认知臭氧总量变化的物理化学过程和对流层臭氧变化的原因,需要多种观测手段获取高质量探测数据作为基础来准确掌握大气臭氧的长期变化趋势和短期变化特征(Kley et al., 1996)。通过分析观测数据,科研人员于 20 世纪 80 年代中期发现春季南极上空存在臭氧洞(Chubachi, 1984; Farman et al., 1985; Stolarski et al., 1986),从此,对南极臭氧洞的监测及形成机理的研究引起人们广泛关注(陆龙骅等, 1997)。

目前,全球大气臭氧总量的观测手段主要有地基(卞建春等, 2005)、卫星(郑向东和韦小丽, 2010)和探空观测(孔琴心等, 1996; Zhang et al., 2014a)等。其中,地基观测常用仪器包括 WOUDC 观测网络的陶普生分光光度计(Dobson ozone spectrophotometer)、布瑞沃尔分光光度计(Brewer ozone spectrophotometer)和滤光片型臭氧测量仪(Filter ozonemeter)。我国有香河(Dobson)、昆明

(Dobson)和瓦里关(Brewer)等观测站点(卞建春等, 2005; 郑向东和韦小丽, 2010)。此外, NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) 观测网络的地基 SAOZ 仪器也在全球多个站点进行大气臭氧总量探测(Pommereau and Goutail, 1988)。卫星观测数据常由 TOMS、GOME、OMI 和 SCIAMACHY 等仪器提供(Burrows et al., 1999; http://www.atmos.physics.utoronto.ca/SPARC/News/22/22_Wellemeyer.html [2016-02-04])。通过分析卫星资料, Zhou and Luo (1994) 在 20 世纪 90 年代发现青藏高原存在臭氧低值中心,成为臭氧研究史上的重大发现之一。对于探空观测,国内科研人员先后研制出了具有自主知识产权的基于电化学原理的单池和双池臭氧探空系统,并已成功开展科学观测(孔琴心等, 1996; 王庚辰等, 2003; Zhang et al., 2014b)。

地基仪器易于维护和标定,其臭氧总量观测资料具有较高的稳定性和延续性,作为检验卫星产品精度的手段之一,推动了卫星反演技术的发展。但是,由于观测仪器类型、定标系统和数据处理方法等存在差异,地基仪器实际观测资料会存在一定不确定性(Vanicek, 2006)。因此,卫星数据可以作为一个相对参考标准来评估地基观测的稳定性和精准

度 (Fioletov et al., 1999)。鉴于各种观测数据均存在测量误差, 需要对不同臭氧探测资料进行对比研究, 以定量获取它们之间的差异 (Bojkov et al., 1988; 郑向东, 2008)。国内外科研人员陆续开展了相关工作, 郑向东和韦小丽 (2010) 指出卫星和地基观测资料存在不同, 张中波等 (2006) 指出两种资料之间具有相关相, Fioletov et al. (1999) 和 Labow et al. (2003) 给出了卫星观测资料相对于地基观测资料所具有的标准差。

本文采用“三重制约法”(戴铁丕等, 1989; 潘闻天等, 1997; 河惠卿等, 2009), 分别对下列 3 组仪器提供的配对臭氧总量数据进行统计分析, 提取出不同观测资料的误差标准差, 进而对比分析了各种仪器的精度特征: 1) 1996~2003 年期间地基 WOUDC 与星载 TOMS 和 GOME 仪器; 2) 2004~2013 年期间地基 WOUDC 与星载 OMI 和 SCIAMACHY 仪器; 3) 2004~2013 年期间地基 SAOZ 与星载 OMI 和 SCIAMACHY 仪器。此外, 单独选取中国境内的 3 个站点分析了不同仪器观测臭氧总量结果的差异。希望本工作能为全球大气臭氧总量的变化趋势和平流层损耗等相关研究提供一定参考。

2 数据资料

1996~2003 年期间地基 WOUDC 与星载 TOMS 和 GOME 仪器配对臭氧总量数据取自北半球中纬度地区 46 个地面站点, 这些站点的地理位置和地面观测仪器等信息如表 1 所示, 其中使用 Brewer、Dobson 和 Filter 仪器的站点数量分别为 12、19 和 15 个 (图 1)。3 类地基仪器观测的臭氧总量数据由 WOUDC 网站 (<http://www.msc-smc.gc.ca/woudc>[2016-02-04]) 提供。地基观测的起始时间为 1996 年, 部分站点在 2002 和 2003 年前后终止观测。由于观测时段存在差异, 不同站点的观测样本数目不同。整体来说, 本文选取站点的观测资料具有较好的持续性和可靠性, 与 TOMS 和 GOME 卫星观测共同匹配的样本数目均大于 500 组。

由于地基 WOUDC 的部分站点终止观测, 本文共使用 2004~2013 年期间 21 个地基 WOUDC 站点 (如表 1 所示) 分析了地基与星载 OMI 和 SCIAMACHY 仪器的精度特征, 3 种资料在这些站

表 1 WOUDC 46 个地基观测站的站号、站名、地理位置、海拔高度和观测仪器

Table 1 The station number, name, geographical position, height above the sea level and the instrument type of the 46 WOUDC ground-based stations

站号	站名	地理位置	海拔/m	仪器
7	日本 Kagoshima	(31.63°N, 130.60°E)	31	Dobson
12*	日本 Sapporo	(43.05°N, 141.33°E)	19	Dobson
14*	日本 Tateno	(36.05°N, 140.13°E)	31	Dobson
16	俄罗斯 Vladivostok	(43.12°N, 131.90°E)	80	Filter
19*	美国 Bismarck	(46.77°N, 00.75°W)	511	Dobson
35*	瑞士 Arosa	(46.77°N, 9.67°E)	1840	Brewer
36	英国 Camborne	(50.22°N, 5.32°W)	88	Brewer
40	法国 Haute Provence	(43.94°N, 5.71°E)	684	Dobson
42	俄罗斯 St. Petersburg	(59.97°N, 30.30°E)	74	Filter
43*	英国 Lerwick	(60.13°N, 1.18°W)	80	Dobson
50	德国 Potsdam	(52.37°N, 13.08°E)	89	Brewer
53*	比利时 Uccle/Brussels	(50.80°N, 4.35°E)	100	Dobson
65	加拿大 Toronto	(43.78°N, 79.47°W)	198	Brewer
67*	美国 Boulder	(40.02°N, 05.25°W)	1390	Dobson
68	波兰 Belsk	(51.84°N, 20.79°E)	180	Dobson
85	俄罗斯 Irkutsk	(52.27°N, 04.35°E)	467	Filter
96*	捷克 Hradec Kralove	(50.18°N, 15.83°E)	285	Dobson
99*	德国 Hohenpeissenberg	(47.80°N, 11.02°E)	975	Brewer
100*	匈牙利 Budapest/K-Puszt	(47.43°N, 19.18°E)	139	Dobson
106*	美国 Nashville	(36.25°N, 86.57°W)	182	Dobson
107*	美国 Wallops Island	(37.93°N, 75.48°W)	13	Dobson
112	俄罗斯 Bolshaya Elan	(46.92°N, 142.73°E)	22	Filter
116	俄罗斯 Moscow	(55.75°N, 37.57°E)	187	Filter
118	俄罗斯 Nagaev	(59.58°N, 150.78°E)	118	Filter
120	俄罗斯 Omsk	(54.93°N, 73.40°E)	119	Filter
121	拉托维亚 Riga	(57.32°N, 24.42°E)	7	Filter
122	俄罗斯 Sverdlovsk	(56.80°N, 60.63°E)	290	Filter
130	俄罗斯 Petropavlosk-Kamchatsky	(52.97°N, 158.75°E)	78	Filter
143	俄罗斯 Krasnoyarsk	(56.00°N, 92.88°E)	137	Filter
148	俄罗斯 Vitim	(59.45°N, 112.58°E)	186	Filter
152*	埃及 Cairo	(30.08°N, 31.28°E)	37	Dobson
153	俄罗斯 Voronez	(51.70°N, 39.17°E)	147	Filter
174*	德国 Lindenberg	(52.22°N, 14.12°E)	112	Brewer
183	哈萨克斯坦 Gurev	(47.02°N, 51.85°E)	0	Filter
208*	中国 Xianghe	(39.77°N, 117.00°E)	80	Dobson
209*	中国 Kunming	(25.02°N, 102.68°E)	1917	Dobson
226	罗马尼亚 Bucharest	(44.48°N, 26.13°E)	100	Dobson
241	加拿大 Saskatoon	(52.11°N, 06.71°W)	550	Brewer
252*	韩国 Seoul	(37.57°N, 126.95°E)	84	Dobson
274	俄罗斯 Nikolaevsk-na-Amure	(53.15°N, 140.70°E)	46	Filter
279*	瑞典 Norrkoping	(58.61°N, 16.12°E)	43	Brewer
287	葡萄牙 Funchal	(32.60°N, 16.90°W)	49	Brewer
290	加拿大 Saturna 岛	(48.78°N, 23.13°W)	178	Brewer
293*	希腊 Athens	(37.99°N, 23.77°E)	110	Dobson
295*	中国瓦里关	(36.17°N, 100.53°E)	3816	Brewer
301*	意大利 Ispra	(45.80°N, 8.63°E)	240	Brewer

注: *表示该站点与星载 OMI 和 SCIAMACHY 进行匹配分析。

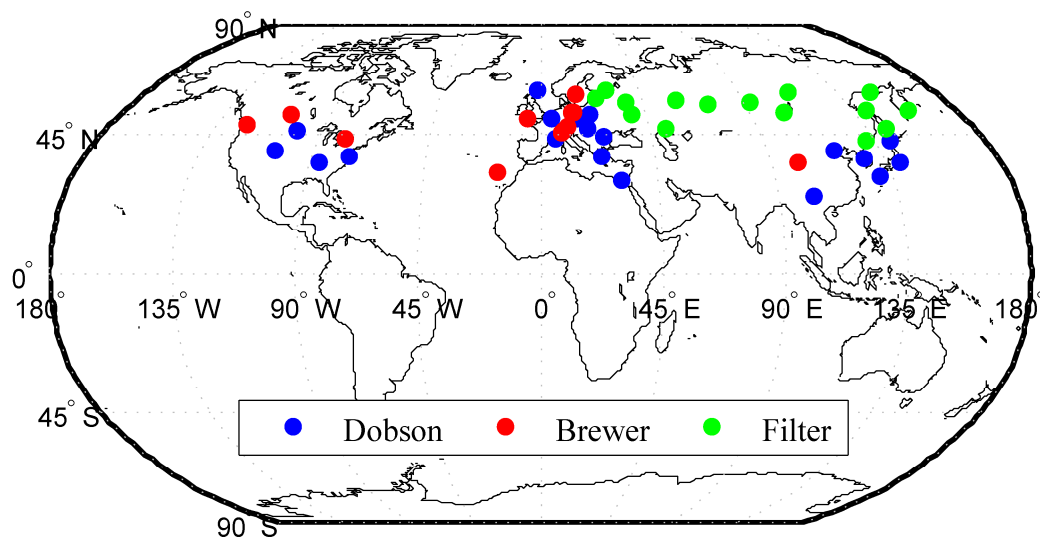


图1 地基 Woudc 观测网络的 Brewer (红点)、Dobson (蓝点) 和 Filter (绿点) 仪器的地面站点分布

Fig. 1 The geographical distributions of the Brewer (red dots), Dobson (blue dots), and Filter (green dots) instruments in the ground-based Woudc network

点的配对样本数目均大于 100 组。此外,还分析了 2004~2013 年期间 8 个地基 SAOZ 仪器与星载 OMI 和 SCIAMACHY 配对观测数据,以提取 SAOZ 精度特征。这 8 个 SAOZ 站点分别为 Haute_Provence (43.9°N, 5.7°E), Kerguelen 岛 (49.4°S, 70.3°E), Sodankyla (67.4°N, 26.6°E), Scoresbysund (70.5°N, 22.0°W), Reunion 岛 (20.9°S, 55.5°E), Bauru (22.3°S, 49.0°W), Dome C (75.1°S, 123.4°E) 和 Rio Gallegos (51.6°S, 69.3°W), 3 类仪器在这些站点的配对样本数目均大于 500 组。

TOMS 为美国 Earth Probe 星载仪器,是用来测量地球整层大气总量的分光辐射探测器,过境时间为 10:30 (地方时,下同)。TOMS 通过测量太阳后向散射紫外辐射来获得大气臭氧含量,是一种跨轨道扫描的 Ebert-Fastie 单色仪,每天可以提供一张经演算得出的全球臭氧分布图。因处理方法不同,TOMS 数据有两个版本,即 TOMS V7 和 V8,时间跨度分别为 1996 年 8 月至 2004 年 6 月和 1996 年 8 月至 2003 年 8 月。TOMS V8 是 V7 的升级产品,除了在云的处理上有所提高(McPeters and Labow, 1996; <http://toms.gsfc.nasa.gov> [2016-02-04]),还消除了极端条件,比如对流层气溶胶、太阳耀斑和高太阳天顶角等引起的误差(http://www.atmos.physics.utoronto.ca/SPARC/News22/22_Wellemeyer.html [2016-02-04])。

GOME 于 1995 年 4 月 21 日搭载欧洲遥感卫星

ERS-2 升空,其主要任务是测量全球大气臭氧和其它几种微量气体的含量和分布情况,过境时间为当地时间 10:30。GOME 为被动式卫星遥感传感器,测量紫外一可见光波段地球表面及大气层的散射和太阳直接辐射,采用 DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) 方法反演大气臭氧斜柱总量,而后除以大气质量因子可得到(垂直)臭氧总量(Burrows et al., 1999)。本文所用 GOME 观测资料时间范围为 1996~2003 年。

SCIAMACHY 搭载欧洲航天局 2002 年 3 月 1 日发射的 ENVISAT-1 太阳同步极轨卫星升空,主要用于监测全球痕量气体、气溶胶和云的分布情况(Bovensmann et al., 1999),利用 DOAS 算法反演臭氧总量(Eskes et al., 2005)。轨道平均高度 799.8 km,倾角 98.55°,轨道周期 100.59 min,过境时间为当地时间 10:00。每天围绕地球约 14 圈,传感器波长范围为 240~2380 nm,每 6 d 对全球扫描 1 次,轨道重复周期为 35 d。该仪器于 2012 年 4 月失效。

OMI 是搭载于 2004 年 7 月 15 日美国发射的 EOS-Aura 卫星上的臭氧监测仪(Levelt et al., 2006)。Aura 为太阳同步轨道的近极轨卫星,轨道高度约为 705 km,约在当地时间 13:45 过境。OMI 传感器通过观测地球大气和表面的后向散射辐射来获取信息。传感器波长范围为 270~500 nm,平均波谱分辨率为 0.5 nm。星下点空间分辨率为 13 km×24 km,

扫描宽度为 2600 km, 1 d 可覆盖全球。利用臭氧在 331.2 nm 和 317.5 nm 波段的强吸收特性进行臭氧总量反演。本文所采用的 OMI 臭氧总量产品利用 DOAS 算法反演得到(Veeffkind et al., 2006)。

3 分析方法

精度、准度和精密度是常用来评价测量结果优劣的 3 个指标(http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=11833 [2016-02-04]; http://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008.pdf [2016-02-04]), 三者示意如图 2 所示, 其中原点表征待测量的真值。精度为多次重复测定同一量时各测定值之间彼此相符合的程度, 表征测定过程中随机误差的大小。测量精度高(图 2a)是指偶然误差较小, 即测量数据比较集中, 但系统误差的大小, 即准度, 并不明确。准度是指在一定实验条件下, 多次测定结果的平均值与真值相符合的程度, 表征系统误差的大小。测量准度高(图 2b)是指系统误差较小, 此时测量数据的平均值偏离真值较小, 但数据分散的情况, 即精度大小, 并不确定。精密度为精度和准度两个指标的综合体。测量精密度高(图 2c)是指偶然误差(精度)和系统误差(准度)都比较小, 这时测量数据集中分布在真值附近。

本文选取多个地基臭氧总量观测站点, 以地基和星载仪器观测的配对臭氧总量数据作为研究对象, 采用“三重制约法”提取各自资料的误差标准差, 进而对比分析了不同仪器的精度特征。由于本研究所采用的“三重制约法”仅能解算出测量数

据的误差标准差即精度特征, 因此只对不同臭氧总量测量资料的精度进行对比分析, 未对准度和精密度进行探讨。“三重制约法”介绍如下:

设臭氧总量实测数据为矩阵 $A = A_{ij}$ ($i=1, 2, 3$; $j=1, 2, \dots, N$), A_{ij} 表示第 i ($i=1, 2, 3$) 种数据源的第 j 次数据, N 表示观测次数即样本容量。设臭氧总量的真值为 $T=(t_1, t_2, \dots, t_N)$, 则第 i 种数据源第 j 次数据的误差为

$$a_{ij} = A_{ij} - t_j, \quad (1)$$

定义误差统计量:

$$\bar{a}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_{ij}, D_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (a_{ij} - \bar{a}_i)^2 \quad (2)$$

分别是第 i 种观测数据的误差平均值和误差方差, 各为表征观测数据准度和精度的定量指标。因为真值未知, 故直接按照此定义不能计算得到误差方差。为此, 按照“三重制约法”(戴铁丕等, 1989; 潘闻天等, 1997; 河惠卿等, 2009), 当 A_i 可由 A 按下列公式解算出 D_i 。令

$$X_{lk}^{(j)} = a_{lj} - a_{kj} = A_{lj} - A_{kj}, \quad (l, k=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

记

$$\bar{X}_{lk} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{lk}^{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (A_{lj} - A_{kj}), \quad (4)$$

则

$$S_{lk} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (X_{lk}^{(j)} - \bar{X}_{lk})^2 \quad (5)$$

表示两种资料之差的样本方差。因为 3 种资料均服从正态分布且两两相互独立, 由统计学中两个相互独立的正态随机变量的和一差原理可得:

$$D_l + D_k = S_{lk} \sqrt{b^2 - 4ac}, \quad (l, k=1, 2, 3; l \neq k) \quad (6)$$

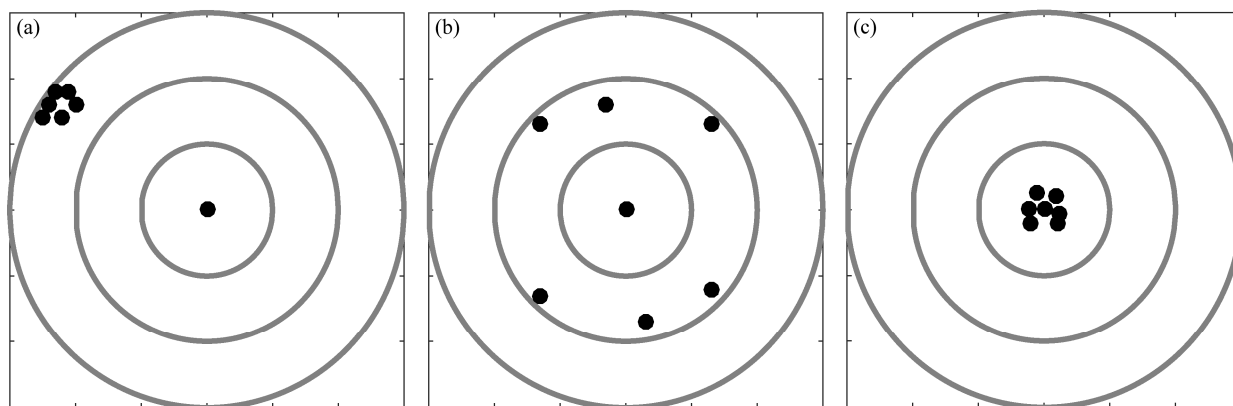


图 2 观测资料的 (a) 精度、(b) 准度和 (c) 精密度示意图

Fig. 2 The diagrammatic sketch of the (a) precision, (b) accuracy, and (c) their combination of the observational data

3 个等式构成以 D_1 、 D_2 和 D_3 为未知数的线性方程组:

$$\begin{cases} D_1 + D_2 = S_{12}, \\ D_2 + D_3 = S_{23}, \\ D_1 + D_3 = S_{31}, \end{cases} \quad (7)$$

由此可以解得 3 个方差:

$$\begin{cases} D_1 = \frac{1}{2}(S_{12} + S_{31} - S_{23}), \\ D_2 = \frac{1}{2}(S_{23} + S_{12} - S_{31}), \\ D_3 = \frac{1}{2}(S_{31} + S_{23} - S_{12}), \end{cases} \quad (8)$$

进而可以求出 3 个误差标准差:

$$\begin{cases} S_1 = \sqrt{D_1} = \sqrt{\frac{1}{2}(S_{12} + S_{31} - S_{23})}, \\ S_2 = \sqrt{D_2} = \sqrt{\frac{1}{2}(S_{23} + S_{12} - S_{31})}, \\ S_3 = \sqrt{D_3} = \sqrt{\frac{1}{2}(S_{31} + S_{23} - S_{12})}. \end{cases} \quad (9)$$

根据统计学原理, 误差标准差越小, 数据的精度越高、越优。因此, 通过对比分析计算得出的 S_1 、 S_2 、 S_3 可以了解 3 组数据的精度分布特征, 具体分析结果如第 3 节所示。

4 分析结果

4.1 WUOUC、TOMS 和 GOME 精度

1996~2003 年期间, 3 类 WUOUC 地基与星载 TOMS V8 和 GOME 仪器在 46 个站点配对数据的样本组数如图 3a 所示, 其中, 最大为 1750 组 (#279 站点), 最小为 560 组 (#143 站点), 大于 1000 组的站点共有 22 个(47.8%)。Brewer、Dobson 和 Filter 测量臭氧总量精度分布如图 3b~3d 所示。Brewer 仪器精度主要分布在 5~10 DU 之间, 共有 7 个站点(58.3%); 最优和最差精度分别为 4.1 DU 和 15.7 DU, 各在瑞士 Arosa (#35 站点) 和加拿大 Toronto (#65 站点)。整体来看, Dobson 观测精度与 Brewer 相当, 但分布更为集中, 在 5~10 DU 之间的站点达到 15 个(79.0%); 最优和最差精度分别为 5.6 DU 和 14.5 DU, 各在捷克 Hradec Kralove (#96 站点) 和英国 Lerwick (#43 站点)。相比之下, Filter 观测精度最差, 除了 Petropavlosk-Kamchatskii (#130 站点) 为 9.7 DU 外, 其余站点均大于 10 DU, 最大值

为 23.6 DU (俄罗斯 Nagaev; #118 站点)。Dobson、Brewer 和 Filter 三类仪器的各自平均精度等信息如表 2 总结。Brewer 精度最优, 平均值为 7.9 ± 3.3 DU/12; Dobson 次之为 8.7 ± 2.3 DU/19, 比 Brewer 略差; 相比之下, Filter 精度明显偏差, 平均值为 14.7 ± 4.0 DU/15。本研究共涉及中国境内的 3 个地面站点, 其中, 瓦里关 Brewer (#295 站点) 精度为 7.8 DU, 略优于所有该类仪器的平均值 (7.9 DU); 香河 (#208 站点) 和昆明 (#209 站点) Dobson 精度分别为 6.7 DU 和 6.6 DU, 明显优于所有该类仪器资料的平均精度 (8.7 DU)。整体来说, 国内 3 个地基站点观测资料均具有较优的精度。

表 2 3 类 WUOUC 地基仪器的站点数目、仪器精度最优值、最差值和平均值及其标准差

Table 2 The number of the three kinds of ground-based WUOUC instruments and their best, worst, and average precisions with the standard deviations

	站点数目	精度/DU		
		最优值	最差值	平均值±标准差
Brewer	12	4.1	15.7	7.9 ± 3.3
Dobson	19	5.6	14.5	8.7 ± 2.3
Filter	15	9.7	23.6	14.7 ± 4.0

TOMS V8 和 GOME 卫星观测数据精度如图 4 所示。对于 TOMS V8, 位于俄罗斯 Nagaev (#118 站点) 和 Petropavlosk-Kamchatsky (#130 站点) 两个 Filter 站点上空的卫星观测资料精度较差, 分别为 16.0 DU 和 22.5 DU。除此之外, 其余站点上空的卫星数据精度均小于 10 DU, 其中最小值为 3.8 DU, 位于埃及 Cairo (#152 站点)。TOMS V8 观测精度主要分布在 5~10 DU 之间, 共有 42 个站点 (91.3%)。相比于 TOMS V8, 不同站点上空的 GOME 观测数据精度变化更为稳定, 最小值和最大值分别为 4.1 DU 和 10.9 DU, 各在昆明 (#208 站点) 和 Petropavlosk-Kamchatskii (#130 站点)。GOME 资料精度在 5~10 DU 之间的站点共有 40 个 (87.0%)。所有地面站点及其对应的 TOMS V8 和 GOME 仪器的平均精度及其标准差等信息如表 3 总结。整体来说, 地面仪器精度较差 (10.5 ± 4.3 DU/46), 这主要是由于 Filter 仪器精度较差引起。两种卫星仪器观测精度相当, 分别为 7.6 ± 2.8 DU/46 和 7.6 ± 1.5 DU/46; 但是, 不同站点上空 GOME 资料精度的标准差 (1.5 DU) 要小于 TOMS V8 (2.8 DU), 表明前者精度在不同地区具有更高的稳定

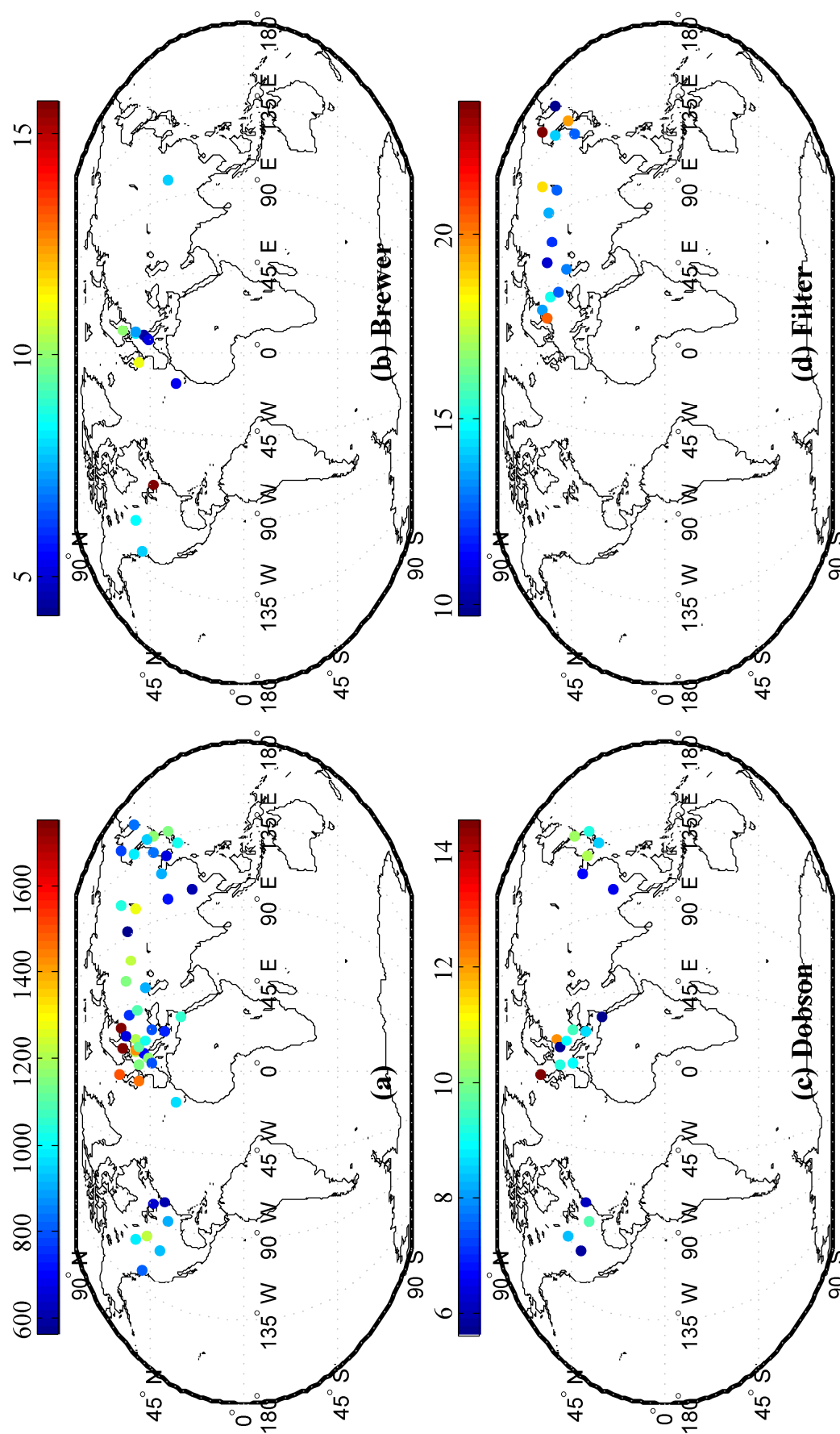


图 3 (a) WouDC、TOMS 和 GOME 仪器在 46 个地面站点匹配数据的样本组数及地基 (b) Brewer、(c) Dobson 和 (d) Filter 观测资料的精度 (单位: DU) 分布

Fig. 3 (a) The sample number of the collocated total ozone column derived from the WouDC instruments, TOMS, and GOME at 46 stations and the precisions (units: DU) of the data collected by the ground-based (b) Brewer, (c) Dobson, and (d) Filter

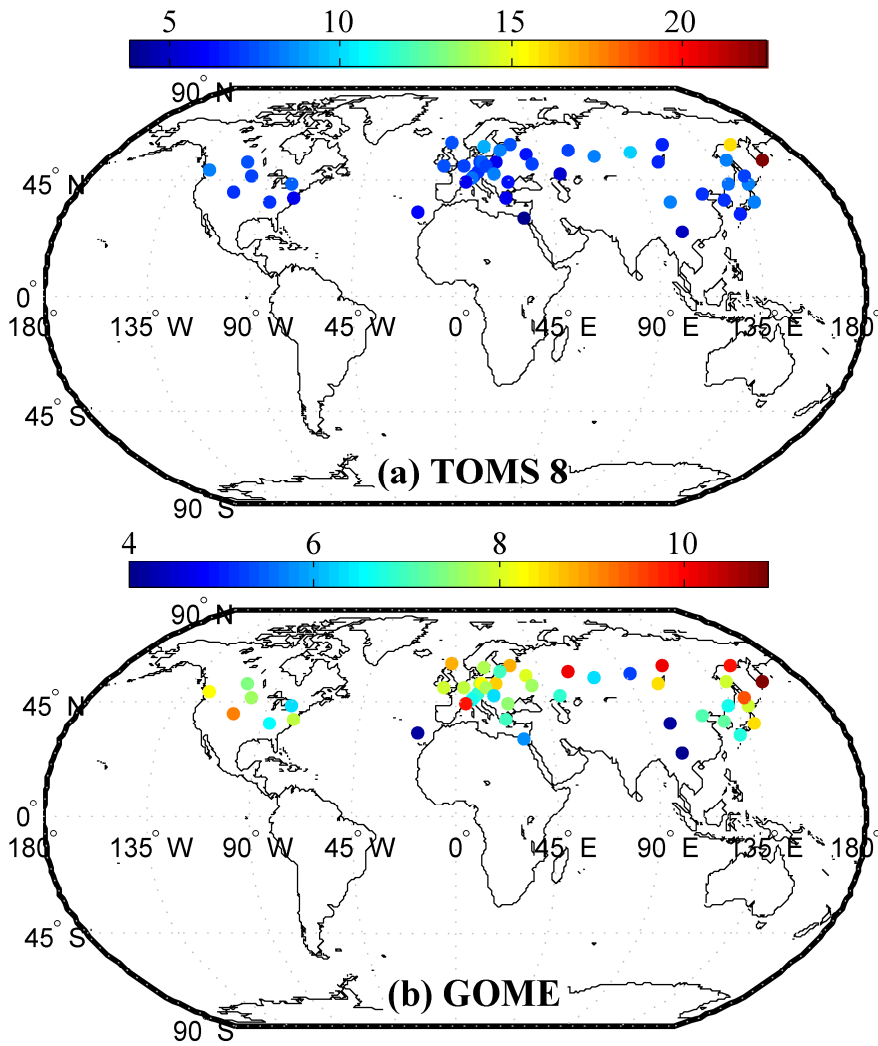


图4 (a) TOMS V8 和 (b) GOME 观测资料的精度 (单位: DU) 分布
Fig. 4 The precisions (units: DU) of the measurements from (a) TOMS V8 and (b) GOME

性。对于国内 3 个站点的地面仪器,瓦里关 Brewer 精度 (7.8 DU) 与两类卫星 (7.6 DU) 相当,香河 (6.7 DU) 和昆明 (6.6 DU) 两台 Dobson 仪器的精度要明显优于上述卫星结果。

表 3 WOUDC、TOMS V8 和 GOME 仪器精度最优值、最差值和平均值及其标准差
Table 3 The best, worst, and average precisions with the standard deviations of the WOUDC instruments, TOMS V8, and GOME

	精度/DU		
	最优值	最差值	平均值±标准差
WOUDC	4.1	23.6	10.5±4.3
TOMS V8	3.8	22.5	7.6±2.8
GOME	4.1	10.9	7.6±1.5

本文进一步使用 TOMS V7 版本资料替换上述

分析计算所用的 TOMS V8 版本资料,地基和 GOME 观测资料保持不变,用同样方法分析了 3 类数据的精度 (结果如表 4 所示)。对比表 3 和表 4 可知,尽管 TOMS 资料由 V8 替换为 V7,但是由于地基和 GOME 资料不变,由“三重制约法”得到的地基和 GOME 两种仪器观测数据的精度基本保持不变,该结果的合理性表明“三重制约法”可以保持精度计算结果的稳定性。相比之下,TOMS V7 资料的精度(8.5 ± 3.0 DU/46)要明显差于 TOMS V8 (7.6 ± 2.8 DU/46),验证后者算法比前者有所提高,这由于对云的处理改进等引起(http://www.atmosph.physics.utoronto.ca/SPARC/News22/22_Wellemeyer.html [2016-02-04])。TOMS V7 采用了 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 非实时遥感的月平均云量和云高数据资料 (McPeters

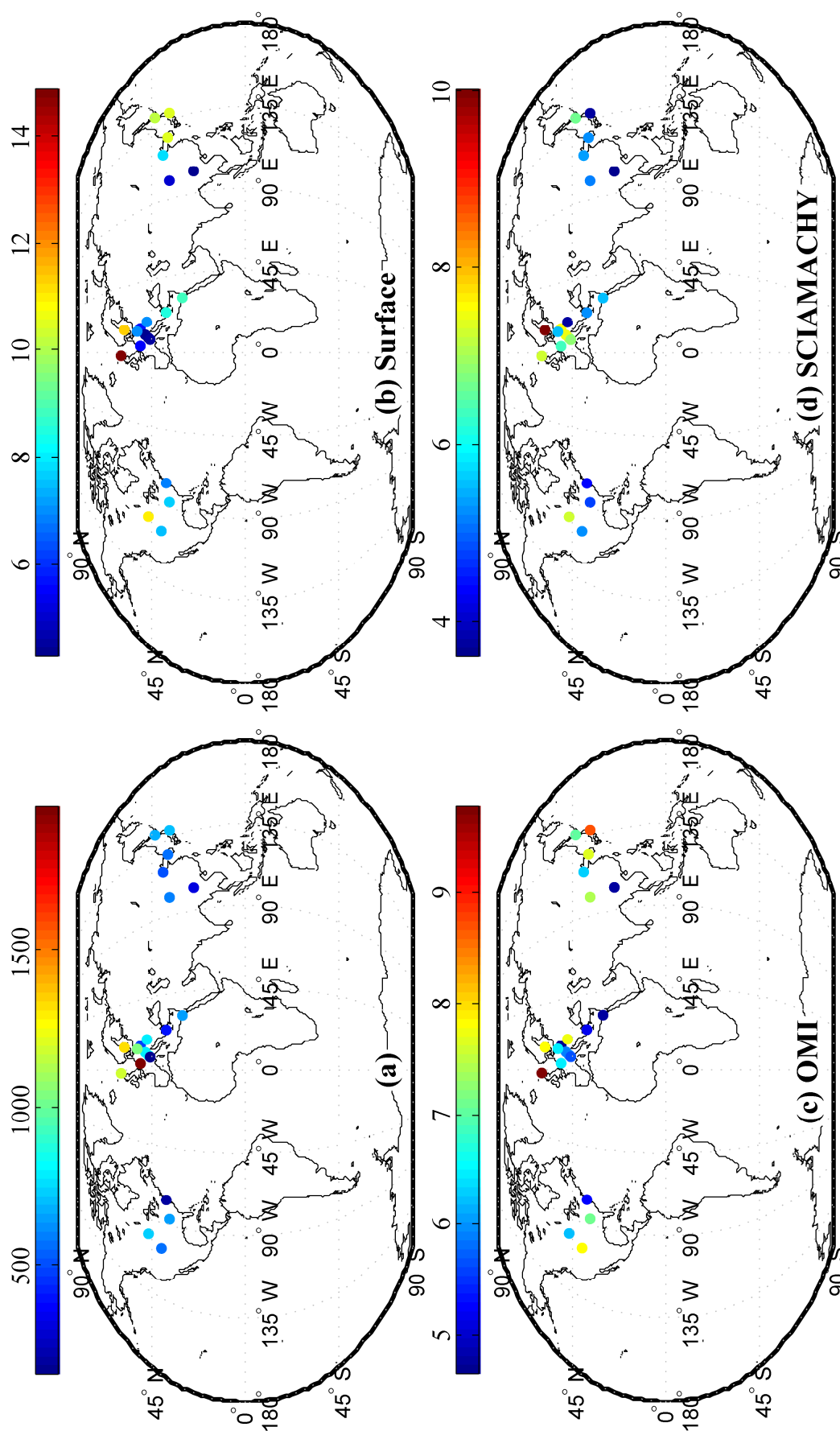


图 5 (a) 地基 WOUDC、OMI 和 SCIAMACHY 在 21 个站点匹配数据的样本组数；地基 (b) WOUDC、(c) OMI 和 (d) SCIAMACHY 的精度 (单位: DU) 分布

Fig. 5 (a) The sample number of the collocated total ozone column derived from the ground-based WOUDC, OMI, and SCIAMACHY at 21 stations and the precisions (units: DU) of the data collected by the ground-based (b) WOUDC, (c) OMI, and (d) SCIAMACHY

and Labow, 1996), 导致臭氧总量测值存在较大误差 (Newchurch et al., 2001; Liu et al., 2003), 而 TOMS V8 臭氧总量产品对云的处理还参考了 THIR (Temperature Humidity Infrared Radiometer)云的产品资料 (<http://toms.gsfc.nasa.gov> [2016-02-04])。

表 4 WOUDC、TOMS V7 和 GOME 仪器精度最优值、最差值和平均值及其标准差

Table 4 The best, worst, and average precisions with the standard deviations of the WOUDC instruments, TOMS V7, and GOME

	精度/DU		
	最优值	最差值	平均值±标准差
WOUDC	4.1	22.4	10.4±4.2
TOMS V7	4.6	22.8	8.5±3.0
GOME	3.8	11.6	7.6±1.7

4.2 WOUDC、OMI 和 SCIAMACHY 精度

图 5a 为 2004~2013 年期间 21 个地基 WOUDC 仪器 (如表 1) 与 OMI 和 SCIAMACHY 观测的配对数据样本组数, 其中大于 500 组的站点共有 16 个 (76.2%)。3 种臭氧总量测量精度如图 5b~5d 所示。WOUDC 仪器精度分布在 4~10 DU 之间的站点共有 15 个 (71.4%)。OMI 和 SCIAMACHY 观测精度主要分布在 5~8 DU 之间, 所占站点分别为 16 个 (76.2%) 和 15 个 (71.4%)。3 类仪器精度信息如表 5 总结。整体来说, OIM 和 SCIAMACHY 观测精度相当, 分别为 6.6 ± 1.4 DU/21 和 6.0 ± 1.6 DU/21。相比之下, 地面仪器精度稍差 (7.8 ± 2.8 DU/21)。在计算 2004~2013 年期间 21 个 WOUDC 地基站点与 OIM 和 SCIAMACHY 探测精度基础上, 本文进一步使用 4.1 节方法匹配 1996~2003 年期间这 21

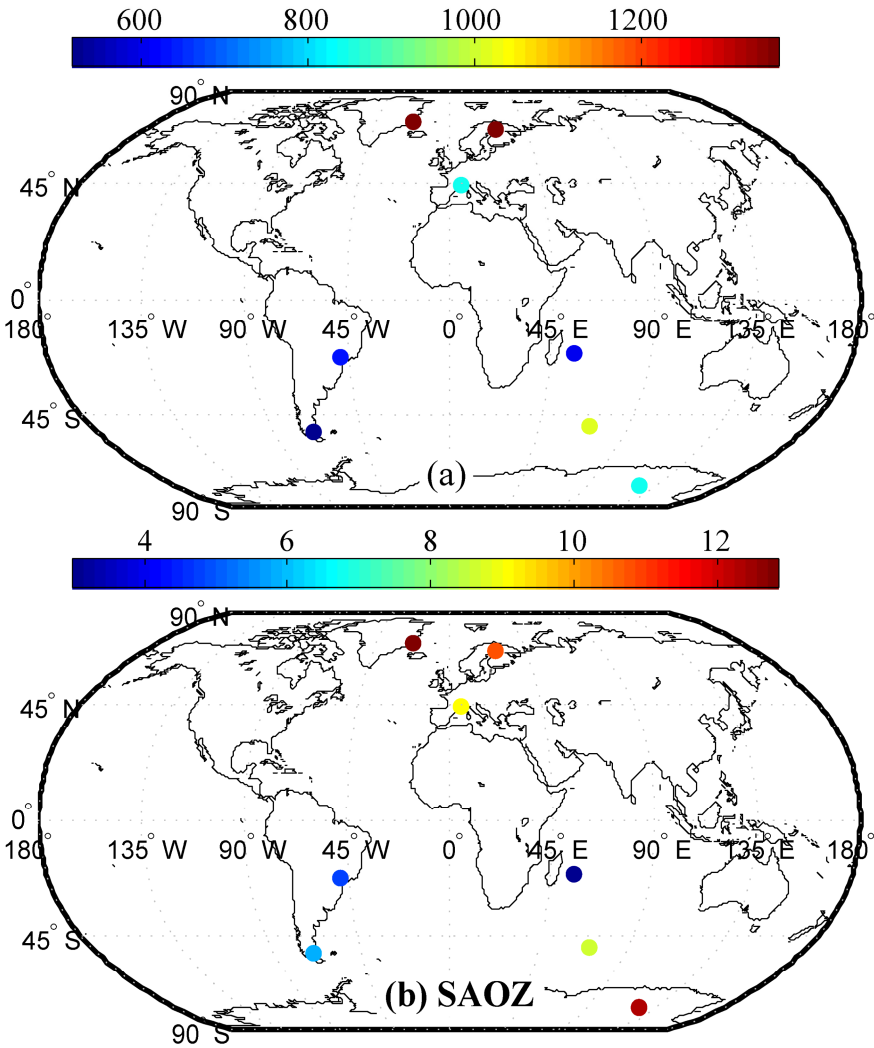


图 6 (a) SAOZ 站点观测资料匹配样本组数及其 (b) 精度 (单位: DU) 分布
Fig. 6 (a) The sample number of the collocated total ozone column at SAOZ sites and (b) the distribution of the SAOZ precisions (units: DU)

个地基站点与 TOMS V8 和 GOME 观测资料，计算得到地基仪器精度为 7.8 ± 2.5 DU/21。可以看出，这 21 个 WOUDC 地基站点的精度在前后两个时间段内较为稳定（1996~2003 年： 7.8 ± 2.5 DU/21；2004~2013 年： 7.8 ± 2.8 DU/21），这也进一步表明“三重制约法”可以保持精度计算结果的稳定性。

4.3 SAOZ 精度

本文匹配分析了 2004~2013 年期间 8 个 SAOZ 地基站点与星载 OMI 和 SCIAMACHY 仪器观测数据，以提取 SAOZ 仪器精度信息（具体如图 6 所示）。最小和最大匹配观测资料数目分别为 517 和 1364。SAOZ 仪器精度最优值和最差值分别为 3.0 和 12.9 DU，各位于 Reunion 岛和 Scoresbysund 站点。SAOZ 仪器平均精度为 8.4 ± 3.6 DU/8，与地基 Dobson 仪器接近（ 8.7 ± 2.3 DU）。

表 5 WOUDC、OMI 和 SCIAMACHY 仪器精度最优值、最差值和平均值及其标准差

Table 5 The best, worst, and average precisions with the standard deviations of the WOUDC instruments, OMI, and SCIAMACHY

	精度/DU		
	最优值	最差值	平均值±标准差
WOUDC	4.3	14.9	7.8 ± 2.8
OMI	4.6	9.8	6.6 ± 1.4
SCIAMACHY	3.6	10.0	6.0 ± 1.6

4.4 国内地基站点臭氧总量观测

1996~2003 年期间地基 WOUDC 与星载 TOMS V8 和 GOME 仪器在中国境内的瓦里关、香河和昆明 3 个站点多年臭氧总量观测结果的年际变化及其标准差如图 7 所示，各个年份中圆点的色标代表 3 种仪器在该年内匹配的观测样本组数。在瓦

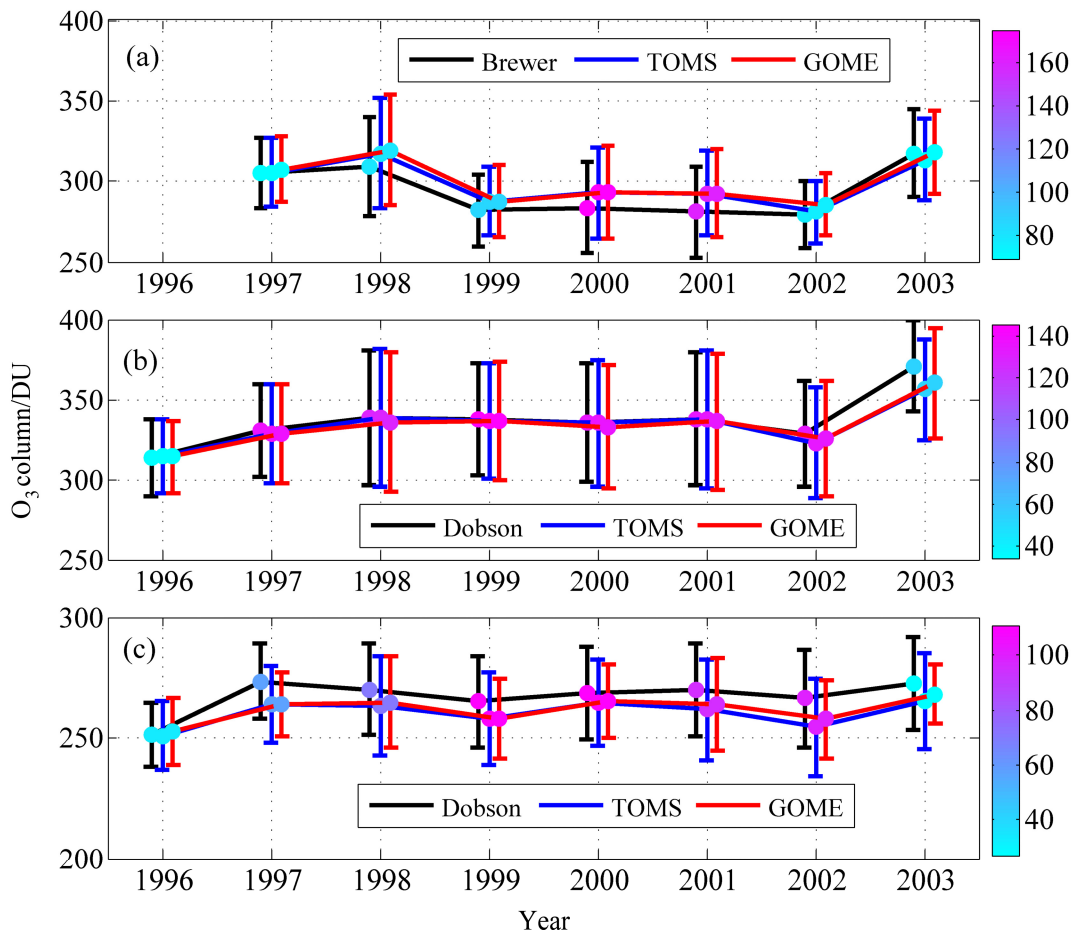


图 7 地基（黑线）与星载 TOMS（蓝线）和 GOME（红线）在中国境内的（a）瓦里关（Brewer）、（b）香河（Dobson）和（c）昆明（Dobson）站点观测臭氧总量的年际变化及其标准差。圆点的色标为各个年份内 3 种仪器匹配的观测样本组数

Fig. 7 Annual variations and their standard errors of the total ozone column derived from the ground-based instrument (black line), TOMS (blue line), and GOME (red line) at (a) Waliguan (Brewer), (b) Xianghe (Dobson), and (c) Kunming (Dobson) sites in China. The color of the dots denotes the sample number of the collocated total ozone column obtained from the three kinds of instruments in a certain year

里关站点(图 7a), 3 类仪器观测臭氧总量基本分布在 280~320 DU 之间, 且呈现出相似的变化趋势, 其中在 1998 年和 2003 年观测到较大臭氧总量值, 1999~2002 年期间变化较为平稳。TOMS 和 GOME 卫星观测结果较为接近, 相比之下, 地基 Brewer 在 1998~2001 年期间低于卫星观测, 其中 2001 年的最大偏差为~11 DU。Brewer、TOMS 和 GOME 年际臭氧总量平均值及其标准差分别为 294.0 ± 16.1 DU、 298.6 ± 13.8 DU 和 300.4 ± 14.3 DU, 地基仪器观测偏低~5 DU。香河站点臭氧总量(图 7b)在大多年份接近 330 DU 上下浮动。相比于瓦里关, 3 类仪器在香河站的观测结果更为吻合, 偏差主要集中在 3 DU 之内; 在 2003 年出现偏差较大应该是由该年内观测样本相对较少(54 组, 如图中色标所示)、代表性较差引起。Dobson、TOMS 和 GOME 观测臭氧总量年际平均值及其标准差分别为 336.5 ± 16.0 DU、 333.8 ± 12.4 DU 和 333.7 ± 13.1 DU, 整体较为接近。昆明站点臭氧总量分布

在 250~280 DU 之间(图 7c), 3 种仪器观测也呈现出较为相似的变化趋势, 整体来说, 地基 Dobson 观测臭氧总量较大, 平均值为 267.1 ± 7.0 DU, GOME 次之为 261.8 ± 5.1 DU, TOMS 最小为 260.2 ± 5.3 DU。

2004~2013 年期间国内 3 个地基 WUOUC 仪器与星载 OMI 和 SCIAMACHY 观测臭氧总量结果如图 8 所示。对于瓦里关站点, 地基 Brewer 和 OMI 在各个年份臭氧总量观测值较为接近, SCIAMACHY 结果明显偏高。3 类仪器的年际臭氧总量平均值及其标准差分别为 289.7 ± 6.9 DU、 291.4 ± 8.3 DU 和 299.9 ± 7.6 DU。尽管地基 Dobson 观测臭氧总量值比 OMI 和 SCIAMACHY 略大, 但 3 种观测结果在香河整体吻合较好, 其年际平均值分别为 345.5 ± 9.9 DU、 336.7 ± 10.9 DU 和 337.9 ± 10.8 DU。昆明站点在 2009 年 9 月至 2012 年 3 月期间缺少地基观测数据, 2010 年之前地基 Dobson 仪器观测结果为 264.8 ± 3.3 DU, SCIAMACHY 次之 (261.7 ± 3.2

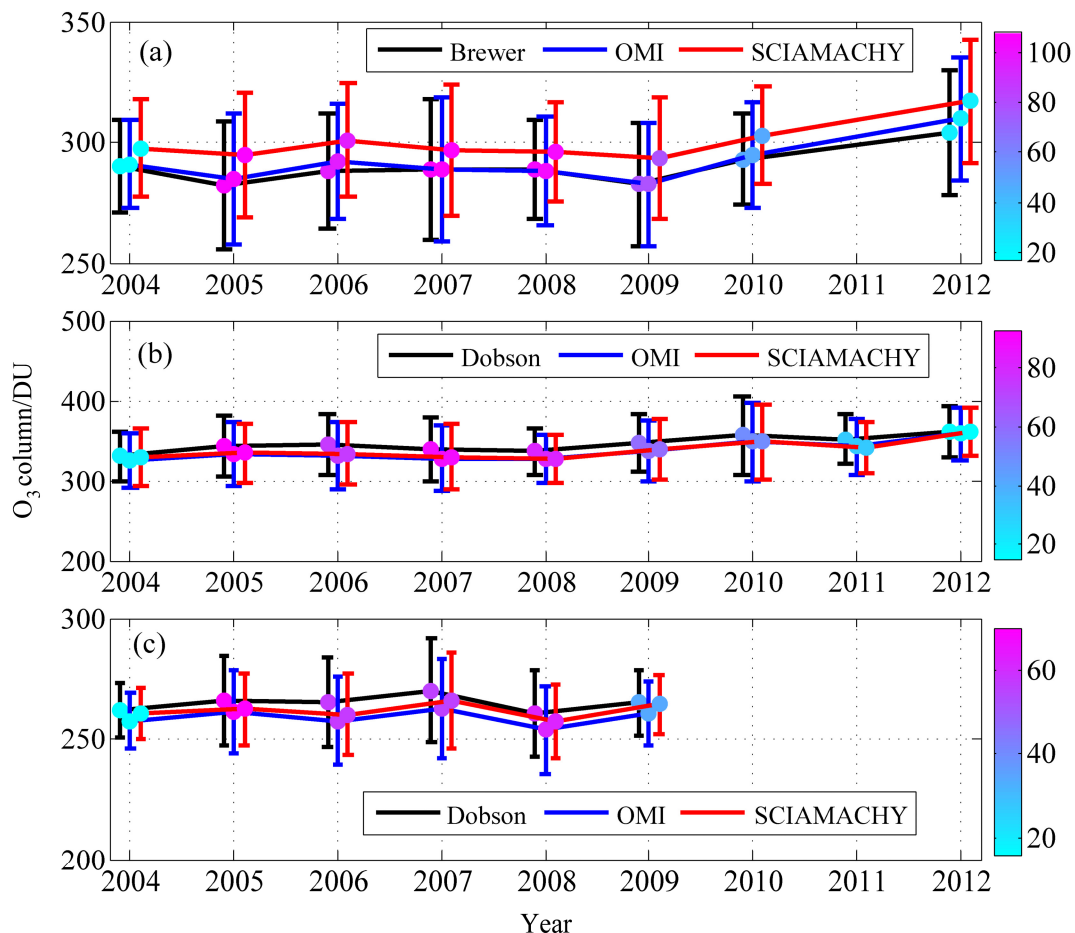


图 8 同图 7, 但为地基(黑线)与星载 OMI(蓝线)和 SCIAMACHY(红线)观测臭氧总量值

Fig. 8 Similar to Fig. 7, but for the total ozone column derived from the ground-based instrument (black line), OMI (blue line), and SCIAMACHY (red line)

DU), OMI 最小 (258.9 ± 3.2 DU)。

5 结论

本文选取多个地基臭氧总量观测站点, 运用“三重制约法”从观测资料的误差定义入手, 在“真值”未知的情况下, 匹配分析了不同地基 (Brewer、Dobson、Filter 和 SAOZ) 与星载仪器 (TOMS、GOME、OMI 和 SCIAMACHY) 观测臭氧总量资料, 求算出了不同资料的误差标准差, 进而对比分析了不同仪器的精度特征, 并单独选取中国境内的 3 个站点分析了不同仪器观测臭氧总量结果的差异。结论如下:

(1) 对于地基观测, Brewer 仪器精度最优, 平均值为 7.9 ± 3.3 DU/12; 其次为 SAOZ (8.4 ± 3.6 DU/8) 和 Dobson (8.7 ± 2.3 DU/19); Filter 最差为 14.7 ± 4.0 DU/15。

(2) TOMS V8 和 GOME 仪器观测精度相当, 分别为 7.6 ± 2.8 DU/46 和 7.6 ± 1.5 DU/46, 后者在不同地区的稳定性更高。OMI 和 SCIAMACHY/IM 在 WOUDC 地基站点的观测精度较为接近, 分别为 6.6 ± 1.4 DU/21 和 6.0 ± 1.6 DU/21。

(3) 对于中国境内的 3 个地面站点, 瓦里关 Brewer 精度为 7.8 DU, 略优于所有该类仪器的平均值 (7.9 DU), 与卫星结果接近 (7.6 DU); 香河和昆明两台 Dobson 仪器的精度分别为 6.7 DU 和 6.6 DU, 明显优于所有该类仪器的平均值 (8.7 DU) 及卫星结果。整体来说, 国内地面仪器观测精度均较优, 并且与卫星测量臭氧总量结果吻合较好。

致谢 对本文所用资料提供方深表感谢, 地基臭氧观测数据从 WOUDC 下载, TOMS 臭氧总量数据从 <http://jwocky.gsfc.nasa.gov> [2016-02-04] 下载, GOME、OMI 和 SCIAMACHY/IM 数据由 TEMIS (Tropospheric Emission Monitoring Internet Service) 下载。

参考文献 (References)

- 卞建春, 陈洪滨, 张中波, 等. 2005. 2002~2003 年北半球中纬地区臭氧总量 TOMS 与地面观测的非常差异 [J]. 科学通报, 50 (5): 495-497.
- Bian Jianchun, Chen Hongbin, Zhang Zhongbo, et al. 2005. Unusual discrepancy between TOMS and ground-based measurements of the total ozone in 2002-2003 [J]. Chinese Science Bulletin, 50 (6): 606-608, doi: 10.1007/BF02897488.
- Bojkov R D, Mateer C L, Hansson A L. 1988. Comparison of ground-based and total ozone mapping spectrometer measurements used in assessing

- the performance of the global ozone observing system [J]. J. Geophys. Res., 93 (D8): 9525-9533, doi: 10.1029/JD093iD08p09525.
- Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, et al. 1999. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes [J]. J. Atmos. Sci., 56 (2): 127-150, doi:10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2.
- Burrows J P, Weber M, Buchwitz M, et al. 1999. The global ozone monitoring experiment (GOME): Mission concept and first scientific results [J]. J. Atmos. Sci., 56 (2): 151-175, doi: 10.1175/1520-0469(1999)056<0151:TGOMEG>2.0.CO;2.
- Chubachi S. 1984. Preliminary result of ozone observations at Syowa station from February 1982 to January 1983 [J]. Memoirs of National Institute of Polar Research, 34: 13-19.
- 戴铁丕, 魏文遂, 王振会, 等. 1989. 用“三重制约法”研究三类测风仪的误差 [J]. 气象, 15 (4): 45-47. Dai Tiepi, Wei Wensui, Wang Zhenhui, et al. 1989. The errors of three kinds of anemoscopes derived from the triple control method [J]. Meteorology (in Chinese), 15 (4): 45-47, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.1989.04.010.
- Eskes H J, van der A R J, Brinksma E J, et al. 2005. Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat [J]. Atmos. Chem. Phys., 5 (4): 4429-4475, doi: 10.5194/acpd-5-4429-2005.
- Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction [J]. Nature, 315 (6016): 207-210, doi: 10.1038/315207a0.
- Fioletov V E, Kerr J B, Hare E W, et al. 1999. An assessment of the world ground-based total ozone network performance from the comparison with satellite data [J]. J. Geophys. Res., 104 (D1): 1737-1747, doi: 10.1029/1998JD100046.
- 何惠卿, 王振会, 金正润, 等. 2009. 三种云导风资料及其对台风数值预报影响试验的比较分析 [J]. 热带气象学报, 25 (1): 82-88. Ha H K, Wang Zhenhui, Kim J Y, et al. 2009. Comparison of three cloud motion wind vectors and impact on typhoon track numerical forecast [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (1): 82-88, doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2009.01.010.
- Kley D, Crutzen P J, Smit H G J, et al. 1996. Observations of near-zero ozone concentrations over the convective Pacific: Effects on air chemistry [J]. Science, 274 (5285): 230-233, doi: 10.1126/science.274.5285.230.
- 孔琴心, 刘广仁, 王庚辰. 1996. 1993 年春季南极中山站上空大气臭氧的观测分析 [J]. 大气科学, 20 (4): 395-400. Kong Qinxin, Liu Guangren, Wang Gengchen. 1996. Observations and analyses of atmospheric ozone over Antarctic Zhongshan station in the spring of 1993 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 20 (4): 395-400, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1996.04.02.
- Labow G J, McPeters R D, Bhartia P K. 2003. A comparison of TOMS Version 8 total column ozone data with data from groundstations [C]//American Geophysical Union, Fall Meeting 2003, abstract #A21D-0994. Washington, DC: AGU.
- Levelt P F, Hilsenrath E, Leppelmeier G W, et al. 2006. Science objectives of the ozone monitoring instrument [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 44 (5): 1199-1208, doi: 10.1109/TGRS.2006.872336.
- Liu X, Newchurch M J, Kim J H. 2003. Occurrence of ozone anomalies over cloudy areas in TOMS version-7 level-2 data [J]. Atmospheric

- Chemistry and Physics, 3 (4): 1113–1129, doi: 10.5194/acp-3-1113-2003.
- 陆龙骅, 卞林根, 贾朋群. 1997. 南极臭氧的短期气候变化特征 [J]. 应用气象学报, 8 (4): 402–412. Lu Longhua, Bian Linggen, Jia Pengqun. 1997. Short-term climatic change of Antarctic ozone [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 8 (4): 402–412.
- McPeters R D, Labow G J. 1996. An assessment of the accuracy of 14.5 years of Nimbus 7 TOMS Version 7 ozone data by comparison with the Dobson network [J]. Geophys. Res. Lett., 23 (25): 3695–3698, doi: 10.1029/96GL03539.
- Newchurch M J, Liu X, Kim J H, et al. 2001. On the accuracy of total ozone mapping spectrometer retrievals over tropical cloudy regions [J]. J. Geophys. Res., 106 (D23): 32325–32326, doi: 10.1029/2000JD000151.
- 潘闻天, 朱玉华, 戴铁丕, 等. 1997. 气象仪器测量误差比较的 n 重制约法 [J]. 南京气象学院学报, 20 (2): 248–250. Pan Wentian, Zhu Yuhua, Dai Tiepi, et al. 1997. n fold restricting method for examining function and measurement errors of meteorological instruments [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 20 (2): 248–250.
- Pommereau J P, Goutail F. 1988. O₃ and NO₂ ground-based measurements by visible spectrometry during arctic winter and spring 1988 [J]. Geophys. Res. Lett., 15 (8): 891–894, doi: 10.1029/GL015i008p00891.
- Stolarski R S, Krueger A J, Schoeberl M R, et al. 1986. Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease [J]. Nature, 322 (6082): 808–811, doi: 10.1038/322808a0.
- Vanicek K. 2006. Differences between ground Dobson, Brewer and satellite TOMS-8, GOME-WFDOAS total ozone observations at Hradec Kralove, Czech [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 6 (12): 5163–5171, doi: 10.5194/acp-6-5163-2006.
- Veefkind J P, de Haan J F, Brinksma E J, et al. 2006. Total ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) using the DOAS technique [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 44 (5): 1239–1244, doi: 10.1109/TGRS.2006.871204.
- Von Der Gathen P, Rex M, Harris N R P, et al. 1995. Observational evidence for chemical ozone depletion over the Arctic in winter 1991–92 [J]. Nature, 375 (6527): 131–134, doi: 10.1038/375131a0.
- 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 等. 2003. 中国大气臭氧探空仪的研制和应用 [J]. 地球科学进展, 18 (3): 471–475. Wang Gengchen, Kong Qinxin, Xuan Yuejian, et al. 2003. Development and application of ozonesonde system in China [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 18 (3): 471–475, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2003.03.0471.
- Zhang J Q, Xuan Y J, Yan X L, et al. 2014a. Development and preliminary evaluation of a double-cell ozonesonde [J]. Adv. Atmos. Sci., 31 (4): 938–947, doi: 10.1007/s00376-013-3104-1.
- Zhang J Q, Xuan Y J, Xia X A, et al. 2014b. Performance evaluation of a self-developed ozonesonde and its application in an intensive observational campaign [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 7 (3): 175–179.
- 张中波, 卞建春, 陈洪滨, 等. 2006. 根据 Brewer 和 TOMS 资料分析、验证瓦里关地区大气臭氧总量变化特征 [J]. 气候与环境研究, 11 (4): 451–456. Zhang Zhongbo, Bian Jianchun, Chen Hongbin, et al. 2006. Analyze and verify variation features of total atmospheric ozone in Mountain Waliguan based on comparison between Brewer and TOMS data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (4): 451–456, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2006.04.02.
- 郑向东. 2008. 云对中国区域卫星观测臭氧总量精度影响的检验分析 [J]. 大气科学, 32 (6): 1431–1444. Zheng Xiangdong. 2008. Investigation on effect of cloud on the precision of total ozone from satellite measurements over China regions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1431–1444, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.17.
- 郑向东, 韦小丽. 2010. 中国 4 个地点地基与卫星臭氧总量长期观测比较 [J]. 应用气象学报, 21 (1): 1–10. Zheng Xiangdong, Wei Xiaoli. 2010. Long-term total ozone comparisons between space-based and ground-based observations at 4 sites in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (1): 1–10, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2010.01.001.
- Zhou X J, Luo C. 1994. Ozone valley over Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica, 8 (4): 505–506.
- 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 1995. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心 [J]. 科学通报, 40 (15): 1396–1398. Zhou Xiuji, Luo Chao, Li Weiliang, et al. 1995. The change of the total ozone in China and the ozone valley over Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 40 (15): 1396–1398.