

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

张中波^{1,2} 卞建春² 陈洪滨² 王振会¹

1 南京信息工程大学应用气象系, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029

摘要 通过对1993年9月~2003年11月瓦里关地区(36.17°N, 100.53°E) Brewer资料和TOMS资料的比较分析, 结果表明: 1) 瓦里关 Brewer 臭氧光谱仪的观测数据与卫星的 TOMS 观测数据之间存在一定的差异, 两者的差异80%以上集中在-2.5%~2.5%之间; 2) 1993~2003年瓦里关地区的大气臭氧总量有着明显的下降趋势, 这与北半球中纬度地区观测到的平流层臭氧减少的趋势相吻合; 3) 瓦里关地区大气臭氧总量存在明显的年际变化和季节变化, 且每年的2~4月较高, 8~10月较低, 一年中振荡的幅度达到60 DU; 4) TOMS两个版本的观测数据与地面观测结果呈现出较好的一致性和相关性, 相关系数达到0.9以上。

关键词 瓦里关 臭氧总量 年际变化 季节变化

文章编号 1006-9585 (2006) 04-0451-06 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

Analyze and Verify Variation Features of Total Atmospheric Ozone in Mountain Waliguan Based on Comparison between Brewer and TOMS Data

ZHANG Zhong-Bo, BIAN Jian-Chun, CHEN Hong-Bin, WANG Zhen-Hui

1 *Department of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract We use Brewer data and TOMS data from September 1993 to November 2003 to analyze the variation characteristics of total atmospheric ozone in Mountain Waliguan (36.17°N, 100.53°E), China. The main results are summarized as follows: 1) Brewer data and TOMS data have some differences, and more than 80% of their differences are between -2.5% and 2.5%. 2) Total ozone in Mountain Galiguan is decreasing, which is correspondent with the stratospheric ozone decreasing trend in mid-latitude area in the Northern Hemisphere. 3) Total ozone amount in Mountain Waliguan has obviously inter-annual variation and seasonal variation. Every year, the ozone amount is high in February through April and low in August through October, and the oscillation amplitude is about 60 DU. 4) Brewer and TOMS measurements of total ozone are generally in good agreement, and the correlation coefficient is above 0.9.

Key words Mountain Waliguan, total ozone, inter-annual variation, seasonal variation

收稿日期 2004-12-13 收到, 2005-09-18 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新重要方向性项目 KZCX3-SW-217

作者简介 张中波, 男, 1981年出生, 硕士, 主要从事大气遥感与探测以及大气环境的研究。E-mail: zhongbo900@163.com

1 引言

大气臭氧是平流层以至对流层中一种很重要的气体成份,最大浓度在 23 km 附近,它的含量虽然很少(在标准状态下,在中纬度,其厚度只有 0.3 cm 或 300 DU),但却能将短于 300 nm 的太阳紫外辐射吸收殆尽^[1]。目前,大气中臭氧浓度的变化及其可能导致的气候和环境效应已引起人们的广泛关注。近来的研究还表明:大气臭氧层的变动可能影响到地球大气辐射平衡、气候、大气上下层的变换,以至人类皮癌患者的数目^[2]。由于臭氧问题涉及到气候变化、生态环境、能源结构等许多直接关系到人类生存和发展的重大问题,因此,大气臭氧研究已成为当前各国科学家和政府官员们共同关心的国际性研究课题^[3]。

我国在大气臭氧研究方面有较长的历史^[4]。早在 20 世纪 50 年代我国便开始了对大气臭氧总含量的观测工作,先后建立了北京(香河)和昆明两个 Dobson 臭氧观测站以及位于青海省瓦里关山(36.17°N, 100.53°E, 海拔 3 810 m)的中国大气本底基准观象台(简称本底台)。魏鼎文等^[5]用北京和昆明两地 1979 年以来 Dobson 臭氧观测资料,研究了臭氧总量的变化。分析结果表明,两地的臭氧总量在不断减少,尤其是 1991 年以后,臭氧总量显著降低。1994 年,周秀骥等人^[6]通过对 1978~1991 年近 13 年美国 Nimbus-7 气象卫星全球 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer: 臭氧总量绘图光谱仪,网格间距为 1.0°(纬度)×1.25°(经度)臭氧资料的分析,发现中国地区臭氧总量呈连续减少的趋势,尤其是青藏高原上空夏季(6~9月)的臭氧总量月平均值比同纬度其它地区为低,即“臭氧低谷”现象。这一发现立即引起了国际科学界的广泛关注,并加速了对青藏高原臭氧总量和其廓线的监测。

青海省瓦里关观测站使用 Brewer 臭氧分光光谱仪对该地区的大气臭氧总量进行了长期连续的观测。本文的目的是根据 1993 年 9 月~2003 年 11 月瓦里关本底站 Brewer 光谱仪对臭氧总量的

观测结果(1998年6~10月缺测),结合 Nimbus 7、Meteor 3 以及 Earth Probe 这 3 颗卫星上的 TOMS 观测资料(1994 年 12 月~1996 年 7 月缺测),对这一地区的大气臭氧总量变化进行分析和探讨,进而分析该地区的臭氧变化特征。因为青海省位于青藏高原东北部地区,本文的分析结果将对青藏高原地区大气臭氧变化的研究具有一定的参考实用价值。

2 观测设备简介及测量的原理和方法

2.1 观测设备简介

Brewer 全自动臭氧光谱仪是根据中加双边大气科学合作计划由加拿大大气环境局援助提供。该仪器由加拿大 Sci-Tech 公司制造生产,用于测量臭氧、二氧化硫和 UV-B; 整个仪器由 Brewer 光谱仪、控制计算机、打印机和控制软件四部分组成; 光谱仪系统由前置光学系统、光谱分光仪、光电转换系统和光电倍增管等组成; 整个仪器的电路系统由主电源板、次电源板、微处理器、输出输入接口板、光子计数器板、时钟日历板、A/D板和脉冲放大器板等部分组成。在计算机和运行程序的控制下,系统将自动完成仪器参数的检测和日常的测量。该仪器分别于 1996 年 11 月、1999 年 4 月用加拿大的标准仪器进行了标定; 在 2002 年 4 月、2003 年 4 月和 2004 年 3 月陆续进行了瓦里关 Brewer 臭氧光谱仪的 3 次国际比对(使用 WMO 标准传递仪器)。在每天的测量过程中,仪器都进行严格的波长校准、标准灯测试等仪器性能检测,以保证观测数据的质量^[7]。

2.2 测量原理和方法

Brewer 臭氧分光光谱仪是世界气象组织(WMO)推荐使用的测量大气臭氧总量和臭氧垂直廓线分布的仪器,它是通过测量直射太阳光、天顶光和直射月光来得到逐日大气臭氧总量的。Brewer 光谱仪可自动进行汞灯波长绝对定标及标准灯(钨丝灯)强度绝对定标。它进行臭氧总量测量的 5 个波长分别为 306.3、310.1、313.5、316.8 和 320.1 nm,在计算大气臭氧总量时需考虑光电倍增管死时间、温度补偿和大气瑞利散射

修正等因素。

3 观测结果及数据分析

3.1 瓦里关地区 Brewer 和 TOMS 臭氧观测数据的对比

TOMS 数据资料有两个版本，即版本 7 和版本 8。与版本 7 相比，版本 8 是基于 TOMS 反演算法开发出的一种新版本。新的算法使用了一系列类似于早期算法的标准臭氧廓线，并且对臭氧和温度廓线、气溶胶指数的订正、表面反射率模式、辐射传输模式进行了改进。所以本文先对地面资料与这两个版本的卫星资料进行比较。

在 1993 年 9 月~2003 年 11 月间，瓦里关本底台使用 Brewer 光谱仪共获得了 1 853 天的臭氧总量观测数据，同期，TOMS 版本 7 的观测资料有 2 777 天，TOMS 版本 8 的观测资料有 2 521 天，两者与地面资料对应的观测分别为 1 738 天和 1 576 天。据此，可以计算出地面和卫星数据两者之间的差异，即 $(G - S)/G$ 。这里，G 指

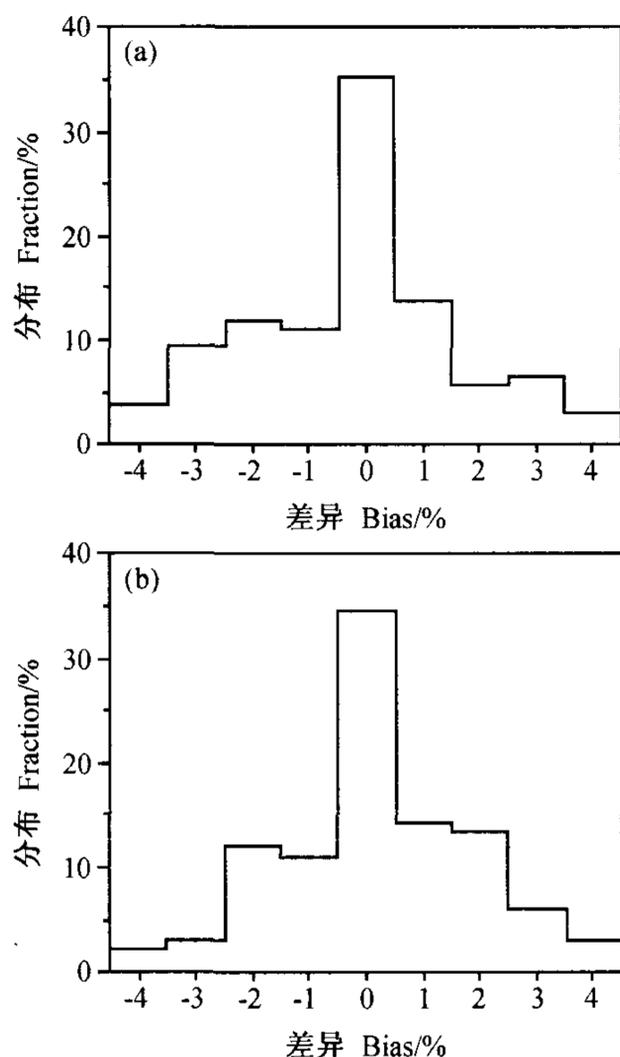


图 1 Brewer 数据与 TOMS 版本 7 (a) 和版本 8 (b) 数据的差异

Fig. 1 The bias between Brewer data and TOMS data version 7 (a) and version 8 (b)

Brewer 仪器的臭氧日观测值，S 指同一天卫星观测的 TOMS 值。图 1 给出了 Brewer 臭氧资料与 TOMS 两个版本资料的比较结果，它显示了两者之间的差异 80% 以上集中在 $-2.5\% \sim 2.5\%$ 之间。

张晓春等^[8]的研究表明，Brewer 臭氧光谱仪与卫星 TOMS 观测值之间的差异主要是由于：一是观测方法之间的系统误差，Brewer 臭氧光谱仪是基于地面的探测，即地基探测；而 TOMS 则属于卫星遥感；二是时间的不同步所引起的误差，TOMS 卫星观测是在飞行中完成的，仅在每天中午时刻进行一次观测，而 Brewer 臭氧光谱仪是定点多次观测数据的平均值；三是云的影响，云量、云高、云状和云的厚度等给 Brewer 臭氧光谱仪和 TOMS 卫星的观测带来误差；四是其他因素带来的误差等等。

尽管两者观测方法的数据之间存在着一定的差异，但是它们之间仍具有较好的相关性和一致性。

图 2 给出了卫星和地面两种方法对应观测数据的相关分析情况，对这两组数据作线性回归分

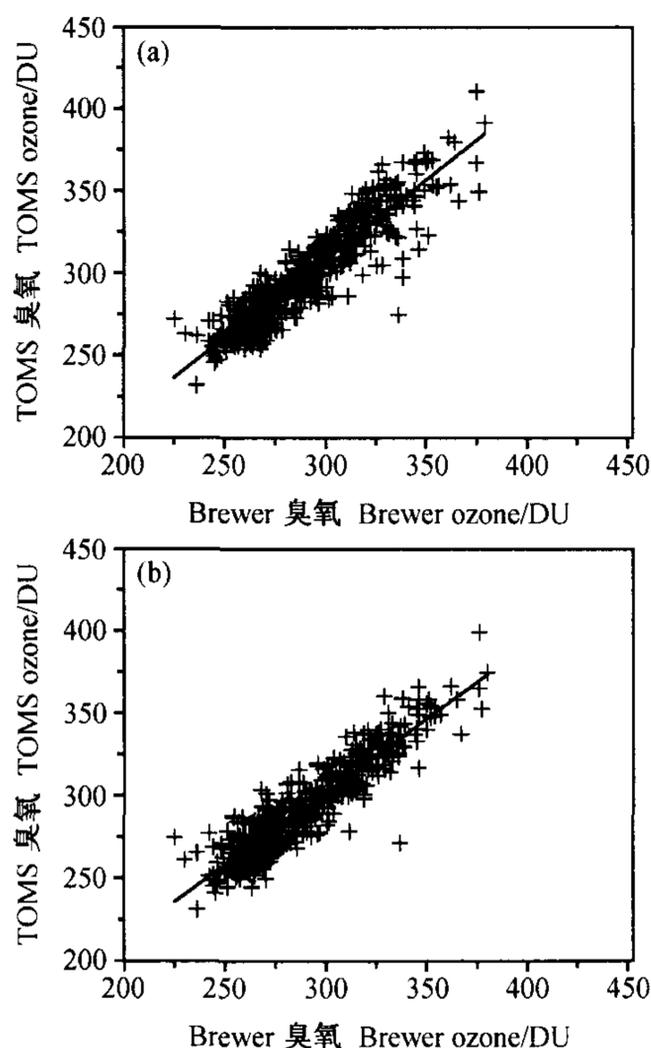


图 2 Brewer 数据与 TOMS 版本 7 (a) 和版本 8 (b) 数据的相关分析

Fig. 2 The correlation analysis between Brewer data and TOMS data version 7 (a) and version 8 (b)

析, 它们的相关系数分别达到 0.918 和 0.923。可见, 二者的相关性非常显著。Brewer 和 TOMS 观测数据之间的线性拟合关系分别为:

$$\text{版本 7: } S = 0.94841 G + 23.4661,$$

$$\text{版本 8: } S = 0.88903 G + 37.8601,$$

因此, 在 Brewer 仪器观测数据缺失时, TOMS 数据可以作为一种参考。

表 1 列出了 Brewer 数据与 TOMS 两个版本数据之间的比较关系。表中的趋势项为使用统计模式计算出的两者月平均偏差的相对趋势。由上述的比较结果可以看出, TOMS 版本 8 的数据与 Brewer 观测数据相符得更好。因此, 在对数据进行分析时, 自 1993 年以来缺测的 Brewer 数据可以基于上述分析用 TOMS 版本 8 的数据来代替。下面的分析就是以这种做法为基础的。

3.2 年际变化和季节变化

图 3 给出了该地区 1993 年 9 月~2003 年 11 月大气臭氧总量的月平均统计变化。由图可见, 瓦里关 Brewer 臭氧光谱仪与卫星 TOMS 的观测数据之间具有较为一致的变化趋势。该地区的臭氧总量变化具有明显的年际变化特征, 气候倾向率为 -1.1 DU/a 。臭氧总量呈现明显的下降趋势, 下降趋势为 -12.72 DU/10 a 。这与北半球中

纬度地区观测到的平流层臭氧减少的趋势相吻合^[9,10]。

大量的观测事实已经证实人类活动是全球平流层大气臭氧乃至大气臭氧柱总量减少的原因之一^[9]。由于瓦里关所处的青藏高原地区是一个特殊的关键地区, 大气臭氧的变化在这样一个特殊的气候和环境条件下, 可能既有自然的因素, 如大尺度大气运动、局地气象条件和太阳活动, 又有人为的因素^[11]。这些错综复杂的相互作用要弄清楚是极其困难的, 需要今后进一步的研究。

图 4 是 1993~2003 年该地区臭氧总量的季节变化。由图可见, 该地区大气臭氧总量存在明显的季节变化, 而且, 一年中 2~4 月臭氧总量明显较高, 8~10 月较低, 且振荡的幅度大约为 60 DU。

我们知道, 臭氧主要集中在平流层, 平流层中的臭氧含量主要由对流层顶高度 (即平流层中下层的高度)、太阳辐射强度和大气环流型式所决定。瓦里关地处北半球中纬度, 由于在冬末春初, 对流层中的对流活动不活跃, 对流层顶高度变化不大, 且太阳辐射在增强, 此时臭氧量有极大值; 夏末秋初, 尽管太阳辐射很强, 但对流层顶的升高使平流层中的温度降低, 臭氧量在此时最少。由于 Brewer 资料有限 (大约为 11 年), 作出的图

表 1 瓦里关地区 TOMS 两个版本数据与 Brewer 数据的比较结果

Table 1 The comparison between Brewer data and two versions data of TOMS in Mountain Waliguan

	偏差 Bias/%	标准差 Standard deviation/%	趋势 Trend/ $\% \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	相关系数 Correlation coefficient	对应观测天数 Corresponding days/d
版本 7 Version 7	-2.22	5.03	7.80	0.918	1738
版本 8 Version 8	-2.10	4.45	2.64	0.923	1576

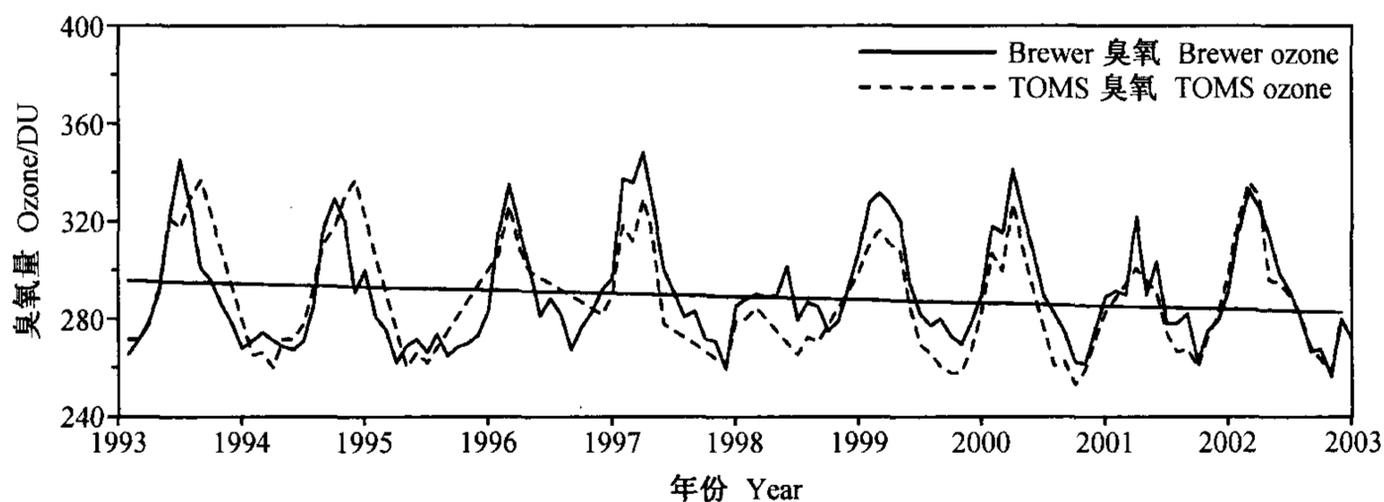


图 3 瓦里关地区臭氧总量的月平均变化 (线性拟合趋势: $y = -0.106x + 295.51$)

Fig. 3 The monthly mean variation of the total ozone in Mountain Waliguan (Linear fitting trend: $y = -0.106x + 295.51$)

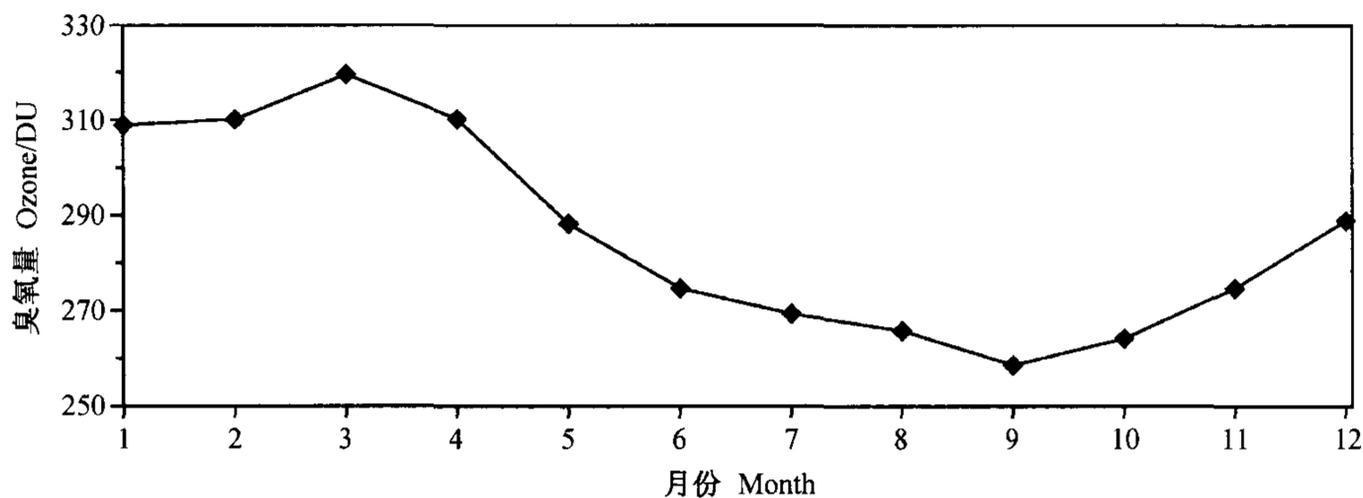


图 4 瓦里关地区臭氧总量的季节变化

Fig. 4 The seasonal variation of the total ozone in Mountain Waliguan

线可能会有差异，但是该结论仍可以作为青藏高原地区大气臭氧总量季节变化的一种参考。

4 结论

(1) 瓦里关 Brewer 臭氧光谱仪与 TOMS 对大气臭氧总量的观测数据存在一定的差异，两者的差异 80% 以上集中在 -2.5%~2.5% 之间；

(2) 1993~2003 年瓦里关地区的大气臭氧总量存在着明显的下降趋势，这与北半球中纬度地区观测到的平流层臭氧减少的趋势相吻合；

(3) 瓦里关地区大气臭氧总量存在明显的年际变化和季节变化，且每年的 2~4 月较高，8~10 月较低，一年中振荡的幅度达到 60 DU；

(4) TOMS 观测两个版本的数据与地面观测结果呈现出较好的一致性和相关性，相关系数达到 0.9 以上。

致谢 衷心感谢为本文提供资料的全球臭氧数据中心 (WOUDC) 和美国航空航天局 (NASA) 的 TOMS 中心。

参考文献 (References)

[1] 周秀骥. 高等大气物理学. 北京: 气象出版社, 1991. 10~19
Zhou Xiuji. *Advanced Atmospheric Physics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 10~19

[2] 王明星. 大气化学. 北京: 气象出版社, 1991. 291~293
Wang Mingxing. *Atmospheric Chemistry* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 291~293

[3] 王贵勤. 大气臭氧层研究简介. 北京: 气象出版社,

1990. 30~50
Wang Guiqin. *Brief Introduction on Atmospheric Ozone Layer Study* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1990. 30~50

[4] 王庚辰. 我国大气臭氧探测技术的进展现状. 地球科学进展, 1991, 6 (6): 31~36
Wang Gengchen. advance of atmospheric ozone sounding technology in China. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1991, 6 (6): 31~36

[5] 魏鼎文, 赵延亮, 秦芳. 中国北京和昆明地区大气臭氧层的异常变化. 科学通报, 1994, 39 (16): 1509~1511
Wei Dingwen, Zhao Yanliang, Qin Fang. Abnormal variation of atmospheric ozone in Beijing and Kunming in China. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1994, 39 (16): 1509~1511

[6] 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, 1996, 40 (15): 1396~1398
Zhou Xiuji, Luo Chao, Li Weiliang, et al. Total ozone variation in China and low center over the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1996, 40 (15): 1396~1398

[7] Guo Song, Zhou Xiuji, Zhang Xiaochun. Preliminary analysis of the measurement results of O₃ and UV-B radiation in the Qinghai Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39 (12): 1011~1015

[8] 张晓春, 郑向东, 汤洁. 青藏高原瓦里关地区大气臭氧柱总量及 UV-B 观测结果的特征分析. 青海气象, 2003, 2: 39~44
Zhang Xiaochun, Zheng Xiangdong, Tang Jie. Analyses of atmospheric total ozone and UV-B observation characteristics in Mountain Waliguan over the Tibetan Plateau (in Chinese). *Qinghai Meteorology*, 2003, 2: 39~44

[9] Bojkov R D. The ozone layer recent development. *Bulletin of World Meteorology Organization*, 1994, 43 (2): 113

~116

- [10] 曲绍厚. 全球大气臭氧层的主要特征和变化趋势. 地球科学进展, 1994, **9** (5): 39~47
Qu Shaohou. Main characteristics and trend in global ozone layer. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1994, **9** (5): 39~47

- [11] 周秀骥, 李维亮, 陈隆勋, 等. 青藏高原地区大气臭氧变化的研究. 气象学报, 2004, **62** (5): 513~527
Zhou Xiuji, Li Weiliang, Chen Longxun, et al. Study of ozone change over the Tibetan Plateau. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 513~527