

# 青藏高原东北部近十年臭氧总量变化研究

金赛花, 王成林, 刘华强, 陈楠  
(解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101)

**摘要:**利用青藏高原东北部青海瓦里关站1997年3月—2009年11月十多年的臭氧总量地基观测资料,对臭氧总量的年际变化、季节变化、频数分布、低值频率等特征进行分析。结果表明,近十多年来青藏高原东北部大气臭氧总量略有下降,臭氧损耗减缓;各年的频数分布呈左偏态分布,且夏秋季节(6—10月)的臭氧低值频率与同期臭氧总量平均值呈现极好的负相关,这可能是引起其年均值较低的原因之一;该地区臭氧总量具有明显的季节变化,夏秋季的臭氧低值频率远远高于冬春季,冬春季臭氧总量平均约为300 DU,夏秋季节平均约为270 DU,最大值出现在3月份,最小值出现在9月份。臭氧总量的连续观测与分析对青藏高原的生态环境与气候能够起到预警作用。

**关键词:**青藏高原;瓦里关;臭氧总量;频数分析;低值频率

**中图分类号:**X508

**文献标识码:**A

**文章编号:**1674-6732(2011)-03-0005-08

## Variation of Total Ozone over Northeast Tibetan Plateau in Recent Ten Years

JIN Sai-hua, WANG Cheng-lin, LIU Hua-qiang, CHEN Nan  
(Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China)

**ABSTRACT:** The variation of the total ozone over Northeast of the Tibetan Plateau was analyzed based on more than ten years of ozone data at Waliguan atmospheric baseline observatory during 1997.03—2009.11. The inter-annual and seasonal variations of total ozone were discussed. Frequency distribution and low value frequency were also analyzed. It was shown that the total ozone over Waliguan decreased slowly. Frequencies of each year showed leftward non-normal distribution from 2000 to 2008. The low value frequency of total ozone from June to October of each year was negatively correlated with the mean value. It was one of the possible reasons of the lower total ozone value in Waliguan. The total ozone over Waliguan exhibited obviously seasonal variation. The low value frequency of total ozone in summer and autumn were much higher than those in spring and winter. The high value was approximately 300DU in winter and spring and the low value was about 270DU in summer and fall. The total ozone over this region reached its maximum in March and the minimum in September. Continuous observation and analysis of total ozone would help forewarn the change of the environment and climate over Tibetan Plateau.

**KEY WORDS:** Tibetan Plateau; Waliguan; total ozone; frequency distribution; low value frequency

## 0 引言

大气中约90%的臭氧(O<sub>3</sub>)集中在平流层,平流层臭氧减少会使其吸收紫外辐射的能力大大减弱,从而导致到达地球表面的UV-B辐射强度明显增加,给人类健康和生态环境带来严重的危害。自从1985年FARMAN等在哈雷湾站观测到了早春时期南极上空臭氧急剧减少,即形成所谓的臭氧洞后,大气臭氧的损耗问题进一步引起了全世界的关注<sup>[1-3]</sup>。大气臭氧含量的减少已成为当今人类所面临的重大环境问题<sup>[4,5]</sup>,监测大气臭氧的

时空变化已成为环境和气象领域的热点和重点。世界气象组织下属的世界臭氧观测网一直利用Dobson、Brewer仪器在地面遥测臭氧总量。中国大陆地区从1979年开始利用Dobson光谱仪正式在香港、昆明开展了臭氧总量观测<sup>[6]</sup>,20世纪90

**收稿日期:**2010-12-24; **修订日期:**2011-04-11

**基金项目:**江苏省环境监测科研基金项目(0919),解放军理工大学基础理论研究基金项目(2008009)。

**作者简介:**金赛花(1983—),女,助教,硕士,从事大气环境领域的研究工作。

年代又在青海瓦里关、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,其中青海瓦里关站点是世界上唯一一个全球大陆性本底观测站点,位于青藏高原的东北边缘。大气臭氧的观测是众多观测项目中的一个重要项目,丰富翔实的背景资料为青藏高原的环境监测与预警、气候预报乃至全球气候变化的研究提供了重要参数。笔者选取青海瓦里关站臭氧总量近十多年来的地基观测数据,从不同角度对大气臭氧总量值进行特征分析,为青藏高原地区大气臭氧变化研究提供理论参考。

## 1 资料来源与监测原理

大气臭氧总量资料取自 WOUDC 的瓦里关地基观测数据,观测仪器为 Brewer # 054 全自动臭氧光谱仪。Brewer 臭氧光谱仪是较为精密的全自动地基光学遥测仪器,其工作原理是利用臭氧在太阳辐射的 Huggins 带(300~350 nm)具有强烈吸收的特性,通过直接测量太阳光、天顶散射光或月光在 Huggins 带 5 个特定波长(306.3, 310.0, 313.5, 316.8, 320.0nm)的辐射强度,完成对臭氧总量的测量,并可通过曙暮时刻(天顶角约 70~90°)的天顶散射光测量,用 Umkher 逆转法反演得到大气臭氧的垂直廓线(平流层为主)。考虑到 SO<sub>2</sub> 在 Huggins 带也有强烈吸收,仪器还增加了对 SO<sub>2</sub> 的观测,以实现臭氧总量的订正,保证臭氧观测的精确度。观测系统包括室外进行观测的光谱仪系统和室内的计算机控制系统,主要由 Brewer 光谱仪、控制计算机、打印机和控制软件 4 部分组成。在每天的测量过程中,仪器都进行严格的波长校准、标准测试等性能检测,以保证观测数据的质量<sup>[7]</sup>。

Brewer # 054 臭氧光谱仪于 1991 年 9 月开始在中国青藏高原东北部的青海瓦里关山地区进行臭氧总量和 UV-B 辐射的业务化观测,最初安装在瓦里关山西侧约 30 km 处的海南州共和气象站(36.27°N, 100.62°E, 2 728 m a. s. l.), 1993 年 8 月迁至瓦里关山大气本底观象台(36.29°N, 100.90°E, 3 816 m a. s. l.)<sup>[8]</sup>,除了 1998 年 6 月 2 日—10 月 7 日移到西藏拉萨(29.67°N, 91.13°E, 3 650 m a. s. l.)进行了一段时间的臭氧总量和 UV-B 辐射观测外<sup>[9]</sup>,该仪器一直长期在瓦里关山监测着大气本底的臭氧总量和 UV-B 辐射变化。

仪器测得的大气臭氧总量单位是 DU(Dobson),为垂直单位气柱中的臭氧分子总数换算到标准温压状况下的厚度,也称为大气厘米,1 DU=10<sup>-3</sup> 大气厘米。本研究选取资料起始时间为 1997 年 3 月,终止时间为 2009 年 11 月。但由于仪器、站点设置等原因,仪器观测前期较多月份数据缺测。1997、1998、1999 年 3 年的观测值较少,1997 年只有 3、4、11、12 月共 4 个月的观测值,1998 年有 1—5、11、12 月共 7 个月的观测值,1999 年有 1、2、6—8、11、12 月共 7 个月的观测值,2000—2008 年的资料相对完整。本研究的目的是对多年的大气臭氧日均值进行统计分析,并进行年际变化、季节变化、频数、低值分析等,研究近十多年来瓦里关大气臭氧的变化特征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 臭氧总量年际变化

臭氧总量年际变化见图 1。

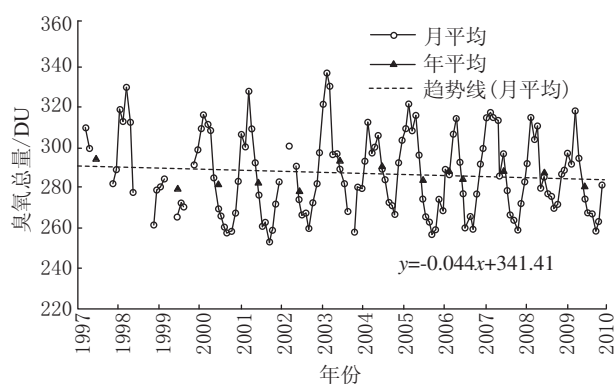


图 1 瓦里关 1997—2009 年臭氧总量年际变化

#### 2.1.1 趋势分析

图 1 给出了青海瓦里关站 1997 年 3 月—2009 年 11 月臭氧总量的年际变化,图中的虚线为线性拟合趋势,黑三角为年均值。从图中可以看出,总体上,1997—2009 年间青藏高原臭氧总量稍有降低,但是幅度明显小于 1979—1992 年所呈现的稳定下降趋势<sup>[10]</sup>,这几年整体臭氧损耗减缓,但 1999—2002 年臭氧总量处于相对低值,之后几年又稍有回升。有研究表明,臭氧总量的损耗从 20 世纪 90 年代中期开始减慢并逐渐开始恢复<sup>[11]</sup>。刘煜等利用二维模式预测青藏高原的臭氧总量于 1995 年之后将处于恢复状态,且恢复速度比同纬度其他地区相对较快<sup>[12]</sup>。这种现象可能是由于蒙

特利尔协议成功控制了臭氧损耗物质的产生,使近年来全球臭氧水平不再像20世纪70年代后期至90年代中期那样一直下降。这一信号在中国的其他站点如香河、昆明、龙凤山比较明显<sup>[13]</sup>,但瓦里关的臭氧总量变化特点例外,这与郑向东等将地基和卫星资料融合得到的结论相符,瓦里关站点尽管1995年前后臭氧总量有小幅回升<sup>[14]</sup>,但1999—2002年瓦里关臭氧总量经历了近30年来的最低值时期。

### 2.1.2 频数分析

为了更好地分析瓦里关臭氧总量的变化特征,对数据相对完整的2000—2008年的臭氧总量日均值作频数分析。表1为2000—2008年的臭氧总量特征统计,特征量主要有每年观测的样本数

(以天计算)、年均值、年最大值、年最小值、偏度值、峰度值等。从表1中可见,2000—2008年中除2002年只有180个样本外,其余每年的样本数均大于80%以上。2003、2004年的年均值较高,分别为293.67,291.87 DU,2000—2002年的臭氧总量较低,2002年最低,为282.41 DU。2002年臭氧均值低可能是臭氧变化的真实反映,也可能由于可用样本数少所致,缺测值主要集中在臭氧高值常出现的1、2、4月份。最大日均值出现在2008年,为400.00 DU,最小日均值出现在2003年,为238.00 DU。年均值变化在280~290 DU,比西藏的年均值(变化范围252.5~271.9 DU)高出20~30 DU<sup>[15]</sup>,这是因为瓦里关纬度比西藏高,中国臭氧含量的空间分布随着纬度的增加而增加<sup>[16]</sup>。

表1 瓦里关2000—2008年臭氧总量统计特征

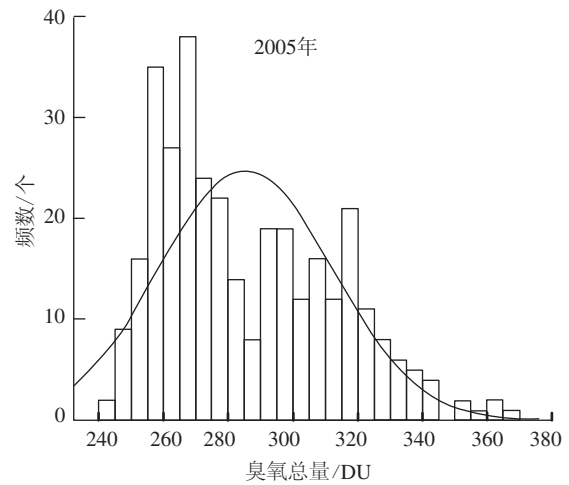
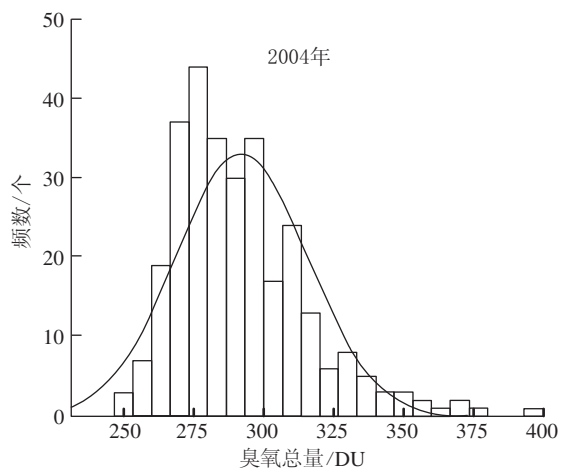
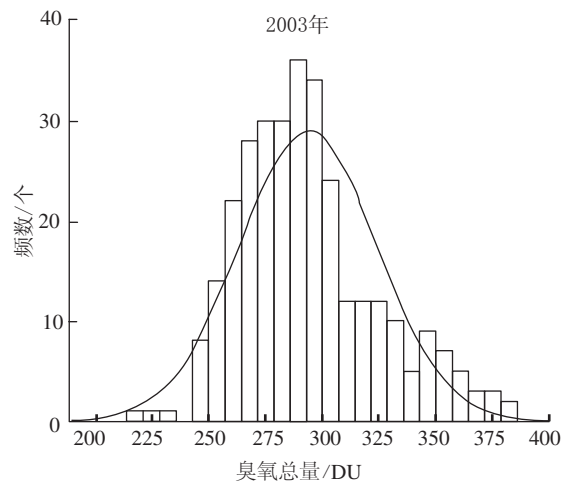
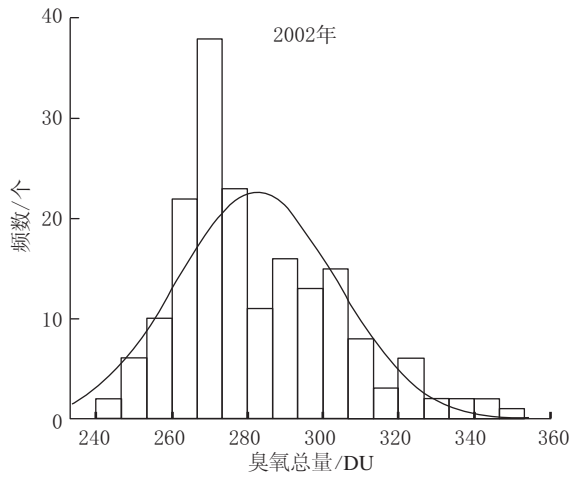
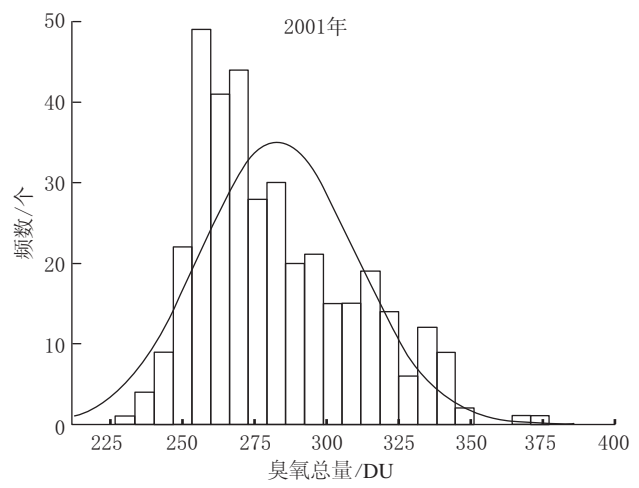
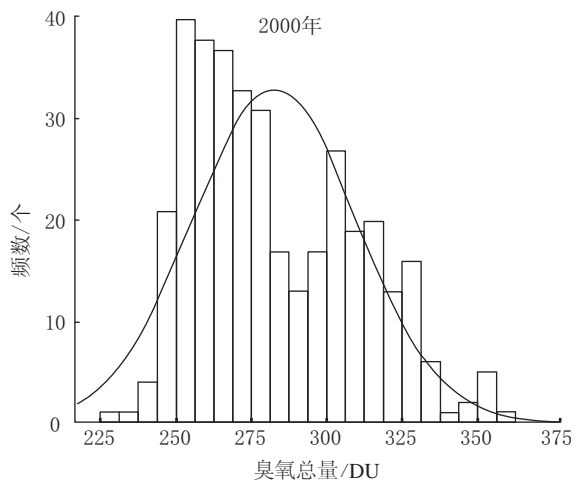
年份	样本数/ 个	年均值/ DU	年最大值/ DU	年最小值/ DU	变化范围/ DU	50%*/ DU	偏度值	峰度值
2000	363	282.63	362.00	230.00	132.00	276.00	0.550	-0.570
2001	363	283.12	376.00	230.00	146.00	276.00	0.717	-0.212
2002	180	282.41	350.00	245.00	105.00	277.00	0.822	0.327
2003	309	293.67	383.00	218.00	165.00	289.00	0.674	0.217
2004	296	291.87	395.00	249.00	146.00	287.00	1.142	1.743
2005	334	285.39	368.00	241.00	127.00	278.00	0.633	-0.420
2006	332	286.34	355.00	242.00	113.00	284.50	0.512	0.020
2007	338	289.08	390.00	219.00	171.00	285.50	0.763	0.926
2008	338	286.58	400.00	238.00	162.00	281.00	1.136	2.318
2000—2008	2853	286.82	400.00	218.00	182.00	281.97	0.750	0.517

注:\*指50%处的值为计算值。

图2为2000—2008各年的臭氧总量频数分布,及其9年的臭氧总量频数总分析图。图中黑实线为标准正态曲线。由图可见数据的频数分布明显与标准正态分布有别,这与偏度、峰度值结果是一致的。除了2004和2008年的偏度值大于1,其余年份的偏度值都大于0而小于1,即每年的频数分布呈左偏态分布,表明臭氧总量观测值的密集区主要集中在相对低值区。2000、2001、2005年的峰度值为负值,其余年份为正值,表明这3年的臭氧高值段所占比例较少。

对2000—2008年的低值变化进行分析,根据

之前研究<sup>[10]</sup>,将臭氧总量值小于280 DU定义为低值范围,统计得2000—2008年低值出现频率依次为:55.9%,54.5%,58.3%,37.5%,37.2%,52.1%,44.9%,45.6%,48.2%。2002年低值所占比例最高,这可能也和2002年所得的样本数过少有关。2003、2004这2年的低值比例明显少于其他年份,这2年臭氧总量的平均值高于其他年份,达到290 DU以上。2005年低值频数比例又急剧上升,2006年有所下降,之后2年缓缓上升。瓦里关每年出现较高的低值频率是引起其年均低值的可能原因之一。



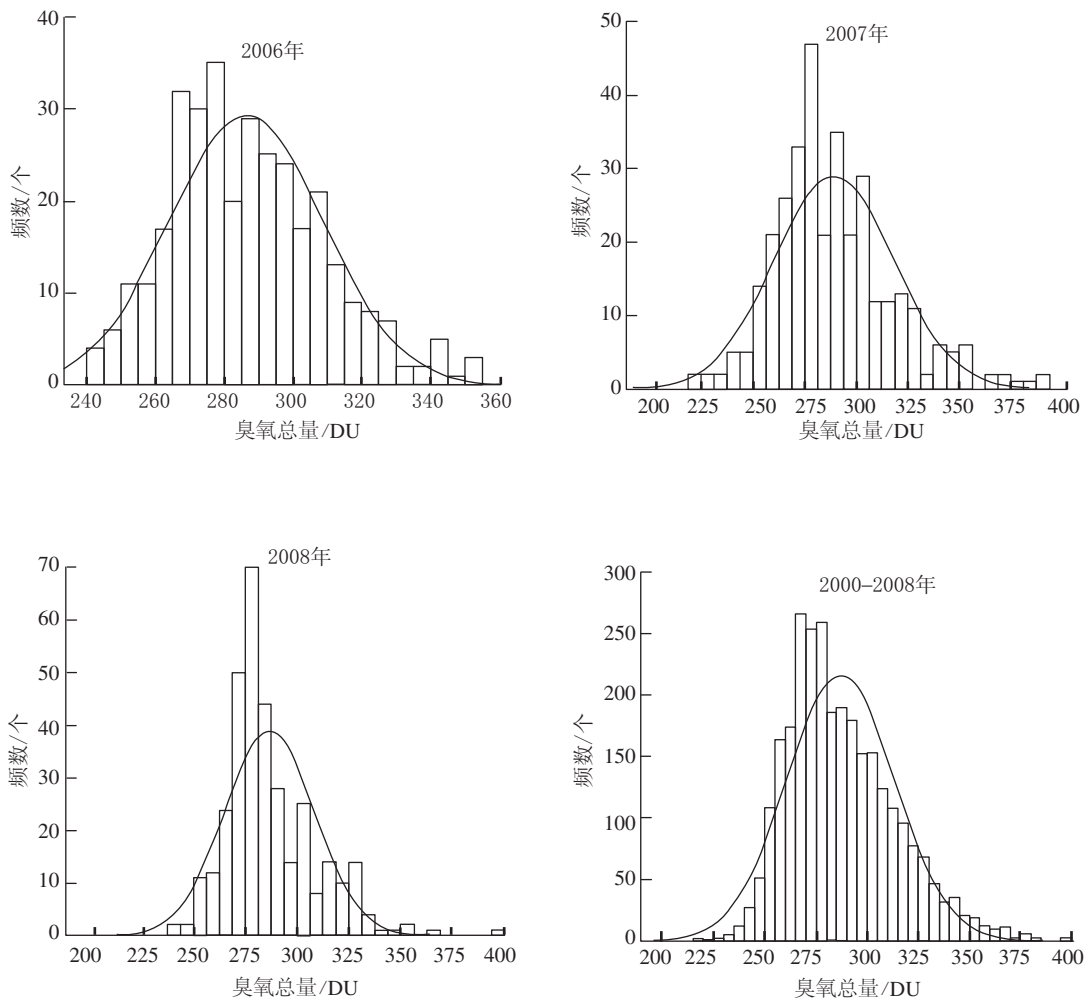


图2 瓦里关 2000—2008 年臭氧总量频数分析

## 2.2 臭氧总量季节变化

### 2.2.1 特征分析

图3给出的是1997—2009年瓦里关臭氧总量的季节变化,由图可见臭氧总量在该地区存在明显的季节变化,在12—4月的冬春季节,臭氧值比较高,3月达到最大值,约为314 DU,从5月开始臭氧总量值逐渐下降,在7—10月一直保持着相对低值,9月达到最低值,约为261 DU,之后又呈上升趋势,振荡的幅度约为54 DU。这种季节变化同其他文献的研究相符<sup>[17,18]</sup>。瓦里关地处北半球中纬度地区,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,此时臭氧量具有极大值;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<sup>[18]</sup>。

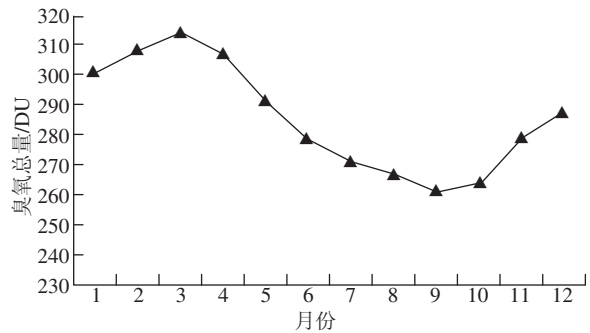


图3 瓦里关 1997—2009 年臭氧总量季节变化

### 2.2.2 各季节频数分析

对1997—2009年四季的臭氧总量数据分别进行频数分析,图4给出了春夏秋冬四季臭氧总量值的频数分布,表2为各个季节臭氧总量统计描述。

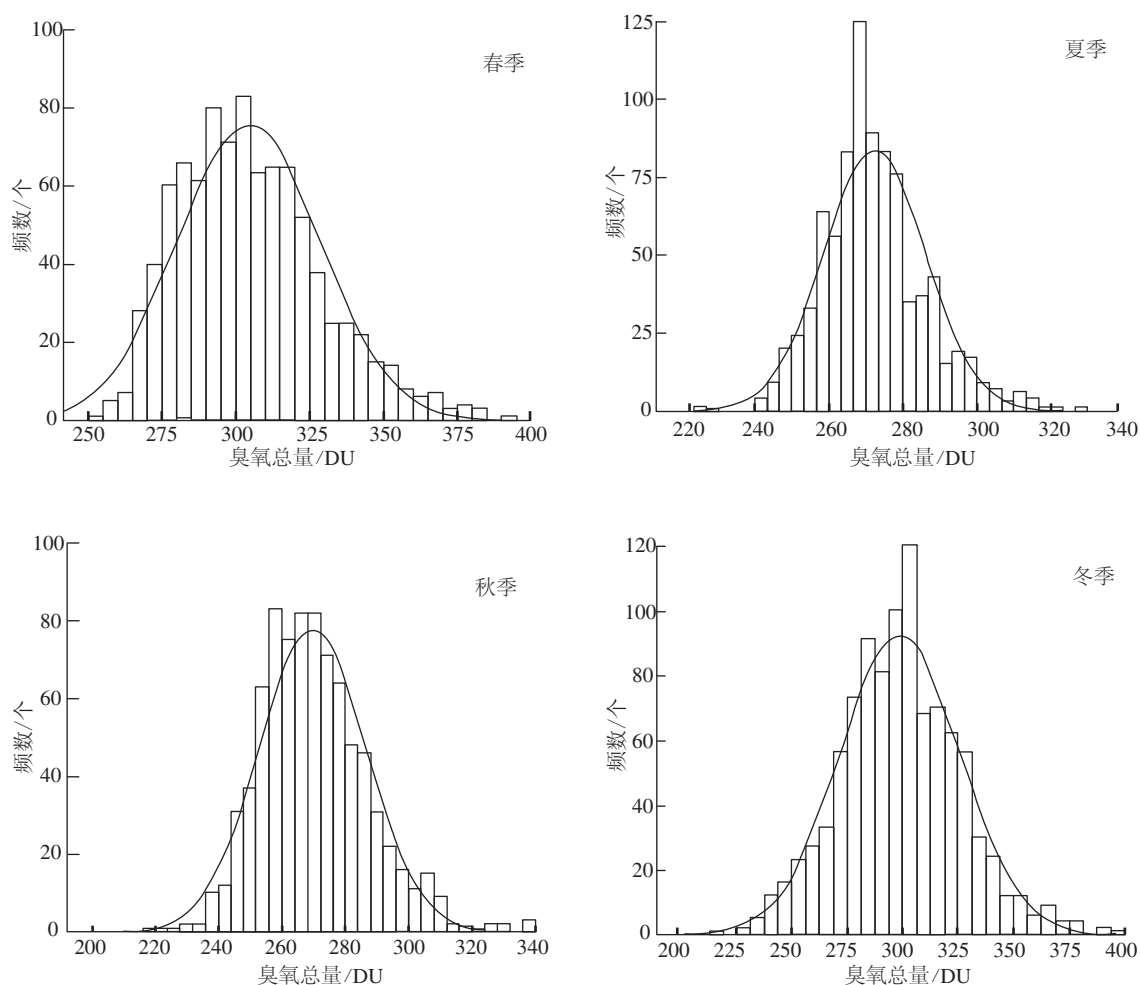


图4 瓦里关 1997—2009 年四季臭氧总量频数分布

表2 瓦里关 1997—2009 年四季臭氧总量统计描述

季节	样本数/ 个	年均值/ DU	年最大值/ DU	年最小值/ DU	变化范围/ DU	偏度值	峰度值	50%*/ DU	75%*/ DU
春	918	304.40	395.00	252.00	143.00	0.633	0.252	301.50	319.00
夏	866	272.30	327.00	225.00	102.00	0.569	0.860	271.00	279.00
秋	825	269.68	337.00	219.00	118.00	0.599	0.904	268.00	280.00
冬	1000	298.84	400.00	218.00	182.00	0.226	0.381	298.00	316.00

注: \* 指 50% 处的值为计算值, 75% 处的值为计算值。

表 2 所示, 在 1997—2009 年四季臭氧总量的样本数各不相同, 冬季 (12—2 月) 样本数最多 (1000 个), 春季次之 (918 个), 夏、秋季最少 (866, 825 个)。臭氧总量的平均值春季 > 冬季 > 夏季 > 秋季, 最大值和最小值都出现在冬季。冬季臭氧变化范围最大, 春季次之, 夏季最小。

结合表 2 和图 4 分析, 春季臭氧总量频数密集段在 275~325 DU, 约占总数的 72%, 春季臭氧平均值为 304.40 DU, 最大值达 395 DU, 最小值为 252 DU, 振幅为 143 DU。而冬季的振幅增加到 182 DU, 由 400 DU 到 218 DU。但由于冬季臭氧总量频数密集段与春季类似, 在 275~325 DU, 约

占总数的66%，所以冬季的臭氧总量均值与春季的臭氧总量均值差异较小，为298.84 DU；在夏季，臭氧总量最大值为327 DU，最小值为225 DU，平均值为272.30 DU，其最大值和平均值都比冬春季有大幅度减少，臭氧总量值在260~280 DU之间的频数约占夏季总数的60%，300 DU以上(包括300 DU)的臭氧值仅出现36次，不超过夏季总数的5%；秋季臭氧总量频数密集段与夏季较相近，在250~280 DU，约占总数的67%，臭氧总量的最大值为337 DU，最小值为219 DU，平均值约为269.68 DU，比夏季平均值略小。由图可见，四季都不呈正态分布，四季频数分布曲线呈左偏，比标准正态峰高。冬季的数值频数分布更接近正态分布，春季偏差最大，夏秋季分布相似。青藏高原夏秋季节臭氧浓度不仅在四季中处于低值，而且在同纬度地区中也处于低值，青藏高原此时存在显著的臭氧损耗现象，其损耗虽不如南极“臭氧洞”，但在北半球是非常异常的现象，称之为“低值中心”<sup>[19]</sup>。

### 2.2.3 低值分析

图5为瓦里关1997—2009年四季低值频率分布图，可见夏秋季臭氧低值频率远远高于冬春季。夏季是臭氧低值频率出现最高的季节，占75.2%，其次是秋季占74.8%，春季最小占15.4%。

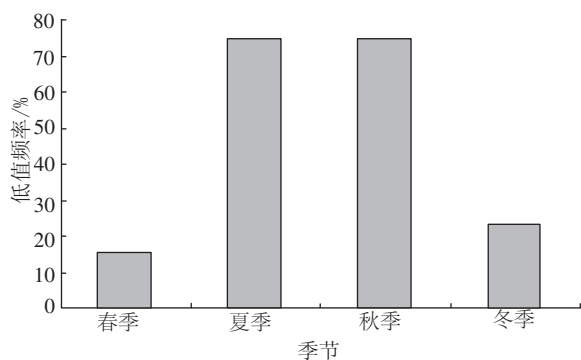


图5 瓦里关1997—2009年臭氧总量四季低值分布

很多学者做了大量研究验证分析青藏高原出现的臭氧低值中心及其变化趋势与形成机理<sup>[12,20-26]</sup>，但目前对青藏高原臭氧低值中心形成的原因及其变化趋势尚不确定<sup>[27]</sup>。普遍认为由于夏季青藏高原上空的动力和热力输送过程形成的特殊环流造成夏季臭氧低值高频出现，形成低值中心。刘煜曾发现夏季(6—9月)低值中心有加深的趋势，但是这种特殊环流不是造成青藏高原臭氧强递减中心的主要原因<sup>[24]</sup>，是由于其平流层下

部臭氧异常减少造成的，而具体的原因至今尚未弄清楚，可能是非均相化学过程造成的<sup>[25]</sup>。

青藏高原的低值中心一般出现在每年的6—10月<sup>[28]</sup>。由图6可见，2000—2002年6—10月的臭氧低值出现频率逐渐缓慢下降，分别为92.7%，90.1%，85.5%，但2003、2004年这2年频率急剧下降，而2005年又急剧上升且为这几年中最高，达96.1%，2006、2007、2008这3年的臭氧低值出现频率又逐渐下降。臭氧总量平均值的变化与低值频率变化具有相反的趋势，由于缺少同纬度其他地区臭氧总量的地基资料，对于低值中心的变化趋势并不能作准确的分析，有待进一步研究。

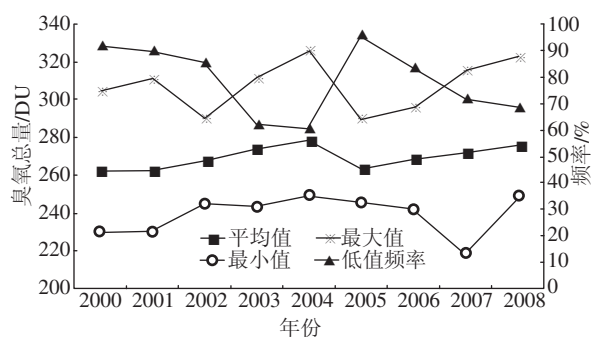


图6 2000—2008年夏秋季(6—10月)臭氧总量变化特征

## 3 结论

(1) 1997年3月—2009年11月近十多年来青藏高原东北部臭氧总量稍有降低，臭氧损耗有所减缓，这可能是由于蒙特利尔协议成功控制了臭氧损耗物质的产生。臭氧变化机制有待进一步研究，应密切关注其变化趋势，不间断的臭氧监测对青藏高原的生态环境起到实时预警的作用。

(2) 瓦里关每年出现臭氧总量低值的频率较高(年频数分布呈左偏态)，尤其6—10月的臭氧总量出现低值的频率与平均值呈现较好的负相关，这可能是引起其年均值较低的原因之一。

(3) 瓦里关臭氧总量具有明显的季节变化，夏秋两季臭氧低值出现频率远远高于冬春两季，冬春季节臭氧总量值较高，平均约为300 DU，夏秋季节较低，平均约为270 DU；最大值出现在3月，最小值出现在9月。臭氧总量的平均值为：春季>冬季>夏季>秋季。

### [参考文献]

[1] FARMAN J C, GARDINER B G, SHANKLIN J D.

- Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal  $\text{ClO}_x/\text{NO}_x$  interaction [J]. *Nature*, 1985, 315: 207 - 210.
- [2] FIOLETOV V E, BODEKER G E, MILLER A J, et al. Global and zonal total ozone variations estimated from ground - based and satellite measurements: 1964 - 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D22):21.
- [3] WMO. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998[R]. 1999.
- [4] GREGORY C R, GEORGE C T, DONALD J W, et al. Seasonal trend analysis of published ground - based and TOMS total ozone data through 1991[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D3):5449 - 5464.
- [5] SCHNEIDER N, LEZEAUX O. Validation of ground - based observation of stratospheric ozone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D17).
- [6] 魏鼎文, 赵延亮, 秦芳, 等. 中国北京和昆明地区大气臭氧层异常变化[J]. *科学通报*, 1994, 39(16):1509 - 1511.
- [7] GUO S, ZHOU X J, ZHANG X C. Preliminary analysis of the measurement results of  $\text{O}_3$  and UV - B radiation in the Qinghai Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(12): 1011 - 1015.
- [8] 郑向东, 周秀骥, 郭松, 等. Brewer 臭氧光谱仪对臭氧总量及 UV - B 辐射的测量[M]//周秀骥, 主编. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 I. 北京: 气象出版社, 1996:107 - 110.
- [9] 郑向东, 石广玉, 汤洁, 等. 拉萨地区 1998 年夏季臭氧总量及垂直廓线的观测研究[J]. *应用气象学报*, 2000, 11(2):173 - 179.
- [10] 祁栋林, 张晓春, 赵玉成, 等. 青藏高原东北部地区大气臭氧变化特征[J]. *青海环境*, 2001, 11(2):55 - 59.
- [11] JAMES K A, MELISSA F. Ground - based observations of the slowdown in ozone decline and onset of ozone increase[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(7).
- [12] 刘煜, 李维亮, 周秀骥. 青藏高原臭氧变化趋势的预测[J]. *中国科学: D 辑*, 2001, 31(增刊):308 - 311.
- [13] REINSEL G C, MILLER A J, WEATHERHEAD E C, et al. Trend analysis of total ozone data for turnaround and dynamical contributions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D16).
- [14] 郑向东, 韦小丽. 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*, 2010, 21(3):1 - 10.
- [15] 除多. 近几年青藏高原大气臭氧总量变化特征[J]. *西藏科技*, 2003(4):28 - 31.
- [16] 谢飞钦, 蔡旭晖. 东亚地区大气整层臭氧浓度的时空变化[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(5):513 - 517.
- [17] 张中波, 卞建春, 陈洪滨, 等. 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*, 2006, 11(4):451 - 456.
- [18] 季崇萍, 邹捍, 周立波. 青藏高原臭氧的准两年振荡[J]. *气候与环境研究*, 2001, 6(4):416 - 424.
- [19] 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 [J]. *科学通报*, 1995, 40(15):1396 - 1398.
- [20] 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[J]. *气象学报*, 2004, 62(6): 513 - 527.
- [21] ZOU H. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23:1029 - 1032.
- [22] 卞建春, 李维亮, 周秀骥. 青藏高原及其临近地区流场结构季节性变化的特征分析[M]//周秀骥, 主编. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环流的影响 II. 北京: 气象出版社, 1997:257 - 273.
- [23] 付超, 李维亮, 周秀骥. 夏季青藏高原上空臭氧总量低值区形成的模拟试验[M]//周秀骥, 主编. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 II. 北京: 气象出版社, 1997:274 - 285.
- [24] LIU Y, LI W, ZHOU X, et al. Mechanism of formation of the ozone valley over the Tibet Plateau in Summer: Transport and Chemical process of ozone[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20:103 - 109.
- [25] 刘煜, 李维亮. 青藏高原臭氧低谷的加深及其可能的影响[J]. *气象学报*, 2001, 59(1):97 - 106.
- [26] 刘煜, 郭彩丽, 李维亮, 等. 青藏高原平流层臭氧和气溶胶的变化趋势研究 [J]. *气象学报*, 2007, 65(6):938 - 945.
- [27] 仇永炎, 魏民, 江爱良, 等. 青藏高原臭氧总量低中心与落基山臭氧低槽的基本特征——兼论高山静力亏损的成因 [J]. *气候与环境研究*, 2008, 13(5):617 - 628.
- [28] 周任君, 陈月娟. 1998 年青藏高原臭氧低值中心异常及其背景环流场的分析[J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(2):169 - 174.