科学通报 2011 年 第 56 卷 第 11 期：848 ~ 857
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

# 南极中山站地面臭氧的监测和本底特征

王玉婷[①], 卞林根[①*], 马永锋[①②], 汤洁[①], 张东启[①], 郑向东[①]

① 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;
② 中国科学院研究生院, 北京 100049
* 联系人, E-mail: blg@cams.cma.gov.cn

2010-11-04 收稿, 2011-01-05 接受
国家自然科学基金(41076132)和国家科技支撑计划(2006BAB18B05)资助

**摘要** 利用南极中山站大气监测站 2008 年全年地面臭氧连续观测资料, 分析了地面臭氧的季节变化特征和本底浓度与风的关系. 结果显示, 来自于站区方向的风向频率很低, 仅占数据样本的 2%, 盛行风(偏东风)频率为 79.2%, 表明中山站地面臭氧浓度监测数据基本未受站区污染影响; 监测数据具有东南极大陆沿岸的本底特征. 中山站地面臭氧浓度季节变化的显著特征是冬季高夏季低, 年平均浓度为 25.0 nmol mol$^{-1}$; 峰值出现在 7 月, 月平均浓度为 34.4 nmol mol$^{-1}$; 谷值在 12 月, 月平均浓度为 12.3 nmol mol$^{-1}$; 此结果与南极大陆其他沿海站点观测相似. 地面臭氧浓度与紫外辐射(UVB)呈显著的负相关, 且极夜期间地面臭氧浓度比极昼期间高 1~2 倍, 说明在南极光化学作用对臭氧的破坏占主导地位. 对中山站臭氧损耗事件的个例分析表明, 臭氧损耗事件的发生与低温和站区北部海冰上的溴化物浓度高值区有密切相关, 结合气流后向轨迹分析表明臭氧损耗事件是由 BrO 的影响所致.

**关键词**
南极
中山站
地面臭氧
本底特征
ODE

臭氧是大气化学中的核心成分之一. 尽管臭氧在大气中的含量很少, 但它对人类和地表生物的生存及地球气候系统的形成都有重要影响[1]. 大气中 90%的臭氧分布在平流层中, 仅 10%的臭氧存在于对流层[2]. IPCC 报告[3]中指出, 平流层臭氧和对流层臭氧在气候变化的辐射强迫系统中的贡献分别为 –0.05±0.10 和 0.35±0.15 W m$^{-2}$. 低层大气中的臭氧与 OH 自由基和氮氧化物的生成有关, 其本身也是一种重要氧化剂, 可以清除很多天然和人为释放的污染物[4]. 由于臭氧对太阳辐射有很强的吸收作用, 地面臭氧也是影响近地层气温的温室气体[5~7]. 另外, 高浓度臭氧会对大气环境造成严重污染, 对人类、动植物和生态环境具有极大危害. 因此, 对流层臭氧的监测与研究已受到了广泛的重视.

观测发现对流层臭氧浓度有逐年增长的趋势. 自从工业革命以来, 对流层臭氧浓度至少增加了 1 倍. 定量得到地面臭氧的本底浓度及变化趋势对评估人为活动的影响程度, 以及为政府部门制订减排政策提供本底信息都是非常重要的[8]. 受到人为影响之前, 自然大气中臭氧浓度的评估值为 10~15 nmol mol$^{-1}$, 近年来许多本底站观测的地面臭氧浓度在 30~60 nmol mol$^{-1}$ 之间, 其增长很大程度上归因于人类活动造成臭氧光化学前体物排放的增加[7].

南极地区是受人类活动影响和环境污染极少的地区, 被视为全球大气的本底. 该地区对流层臭氧的源汇很少, 其浓度主要由光化学反应过程、远距离输送以及平流层臭氧的向下传输所决定[7]. 因此, 在南极地区进行地面臭氧监测对全球地面臭氧的浓度变化和趋势有很好的指示作用. 南极地区地面臭氧的观测始于 20 世纪 50 年代, 但到目前为止全球大气监测网(GAW)在南极地区仅有 2 个全球站开展地面臭氧的长期观测 (http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_homeen.html). 另外, 有少数区域站也进行地面臭氧观测, 但相对于其他地区南极臭氧观测资

**英文版见**: Wang Y T, Bian L G, Ma Y F, et al. Surface ozone monitoring and background characteristics at Zhongshan Station over Antarctica. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4406-2

料仍然十分稀少.

南极地面臭氧季节变化具有明显的冬季高夏季低的特征[9], 季节变化振幅约为年平均浓度的50%[10]. 20世纪80年代, Oltmans[11]发现了北极地面臭氧在冬末春初会出现剧烈损耗的事件(ODE), 引起了广泛的关注. 20世纪90年代末, 南极地区也发现了地面臭氧损耗事件[12]. 研究发现极地臭氧损耗事件与卤素浓度有关, ODE发生时期地面臭氧与溴呈显著的负相关[13,14]. 活性溴族(Br和BrO)主要来源是海盐中通过光化学反应(即"溴爆炸")释放的溴化物, 但是海盐中的溴化物如何转化为气相的过程仍不十分清楚. 低温条件下, 在无冰区海水结冰并在冰面上形成冰花或霜花的过程中, 能够释放出BrO[15]. 最新研究也证明了卫星观测的BrO主要分布在新生的海冰区[16].

我国对于极地臭氧的研究主要集中于南极平流层臭氧洞、臭氧总量变化和臭氧垂直廓线. 1993年中国第九次南极考察队开始在中山站用臭氧光谱仪(Brewer)进行臭氧总量和紫外辐射(UVB)的观测, 周秀骥等人[17]、郑向东等人[18,19]分析指出, 中山站春季臭氧洞期间臭氧总量的变化幅度很大, 这与中山站处于南极春季"臭氧洞"的边缘, 受极地涡旋和"臭氧洞"快速变动有关, 并伴随UVB辐射的明显增强. 郭松等人[20]指出臭氧减少主要发生在平流层下层. 陆龙骅等人[21]利用1999~2000年中国首次北极考察和第16次南极科学考察走航期间获得的地面臭氧资料, 揭示出了地面臭氧随纬度的变化和不同纬度地区地面臭氧的日变化特征. 谢周清等人[22]分析了北极对流层臭氧与大气中汞亏损及海冰演变的关系.

在第四次国际极地年(2008/2009)中国行动计划的支持下, 我国第24次南极科学考察队在南极建立了第一个大气本底监测站, 首次实现对中山站地区大气本底的连续监测. 本文利用中山站2008年全年的地面臭氧和地面气象观测数据, 并结合相关资料分析了中山站地面臭氧的本底浓度及其季节变化特征, 为研究和评估南极在全球变化中的作用提供参考依据.

## 1 观测环境与数据采集

图1给出了南极中山站大气化学观测室的地形和夏季实景. 观测室位于站区西北端的天鹅岭西侧平坦区(69°22′12″ S, 76°21′49″ E, 海拔高度18.5 m), 北面和西面是内拉峡湾, 东北为双峰山, 西南与小西天相望, 东南是中山站观测设施最集中的前山坡、观景山、气象山地区, 南侧可见站区内最大湖泊——莫愁湖. 主导风向为偏东风.

南极中山站地面臭氧观测采用ECOtech公司生产的符合世界气象组织(WMO)大气本底监测标准要求的臭氧观测标准仪器EC9810A紫外光度吸收地面臭氧分析仪和EC9811紫外光度吸收臭氧校准仪进行观测. 分析仪自备信息存储系统, 采集频率为3 min, 可实时下载资料. 为了防止数据丢失, 另外采用CR1000数据采集器实时记录EC9810A输出资料. 由臭氧校准仪每3个月对臭氧分析仪进行校准, 每次




**图1 中山站大气化学监测站位置(a)和观测室夏季实景(b)**

采用 5 个标准的臭氧标气进行标校, 同时记录 EC9811 和 EC9810A 的测量数据. 2008 年进行了 5 次校准, 相关系数 $r$ 全部大于 0.9995, 达到观测数据校准质量的要求. 另外, 本文还利用了 GAW 全球温室气体数据中心(WCDGG)其他南极大陆站点 2008 年的地面臭氧资料(http://gaw.kishou.go.jp/cgi-bin/wdcgg/catalogue.cgi)和德国不莱梅大学环境物理研究所的 SCIAMACHY 卫星监测的大气 BrO 垂直总量分布资料[23,24](http://www.iup.uni-bremen.de/doas/bro_from_scia.htm).

对 2008 年 1~12 月每 3 分钟采集的地面臭氧浓度数据进行处理得到每小时的平均值. 为了滤除资料中的异常值, 以 $|x_i - \bar{x}| > 3\sigma$ 作为判据, 采用方差检验的方法进行剔除, 其中 $x_i$ 为测量值, $\bar{x}$ 是时间序列平均, $\sigma$是标准差. 经处理之后, 小时平均数据的完整率为 95.6%.

## 2 结果与讨论

### 2.1 风对地面臭氧浓度的影响

地面风是影响观测值波动的重要因子之一[25,26]. 提取未受局地因素直接影响且能反映大气本底状况的观测数据, 是研究大气地面臭氧本底特征、源汇影响以及其他相关分析的基础. 考虑盛行风向的影响, 南极中山站大气监测系统的机房设在站区西北端, 最有可能影响大气化学观测的站区内污染源是发电栋和垃圾焚烧炉, 位于观测机房的 135°方位角上, 距离约为 400 m, 两者中间有前山坡、观景山、气象山等山丘阻隔. 当出现东南风时, 可能会对测量产生影响.

将中山站 2008 年全年风向和风速资料绘成 16 方位风向玫瑰图, 并统计各个方位的风向对应的地面臭氧小时平均浓度, 计算出各风向上地面臭氧浓度的平均值(图 2). 由图 2 可知, 中山站全年主导风向为东风或偏东风(45°~135°之间), 其出现频率为 79.2%, 因此到达大气化学观测站的气流主要来自偏东方向的沿海和东北面的海上. 从全年风向来看, 东风下地面臭氧平均浓度最高, 为 26.8 nmol mol$^{-1}$, 其次是偏东风、偏西风和西南风, 北风或偏北风条件下地面臭氧平均浓度最低, 约为 16 nmol mol$^{-1}$. 当出现东南风(135°)时, 地面臭氧浓度并没有升高, 平均浓度为 22.8 nmol mol$^{-1}$, 这是因为东南风出现频次很小(仅占 2%), 对观测没有造成明显影响; 当风向为北

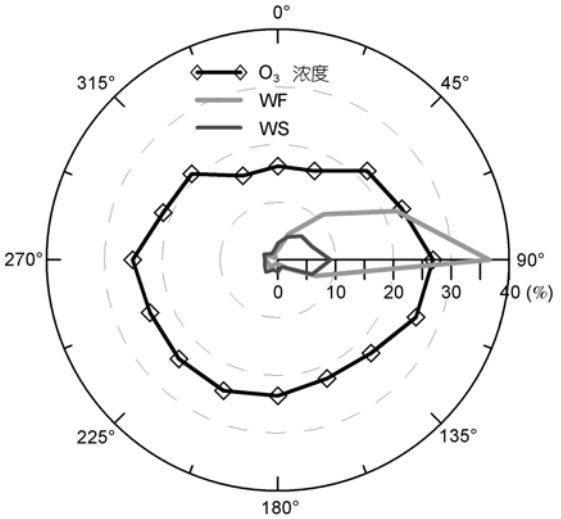



**图 2 2008 年风玫瑰图以及各风向对应的风速(WS)和地面臭氧($O_3$)浓度**

风或偏北风时, 地面臭氧浓度比其他风向的浓度低 5 nmol mol$^{-1}$ 以上, 可能是从海洋上吹来的气团中臭氧含量比较低造成的. 为进一步分析不同季节风向对地面臭氧浓度的影响, 我们对 2008 年逐月风向和风速资料进行了分析(图 3). 中山站 2008 年 1, 2, 11, 12 月(夏季)主导风向为东北风或东北偏东风, 其他月份主导风向为东风, 从每月各风向地面臭氧的平均浓度来看, 地面臭氧浓度受风向影响很小, 只有 12 月出现西北风和东南偏南风时, 地面臭氧浓度比其他风向有所升高, 但其出现频率很小(<1%), 可能是由于样本数量很少造成的, 为排除这种情况对本底浓度的影响, 我们将这部分样本数据剔除. 由每月风玫瑰图可知, 当出现北风时, 地面臭氧浓度没有明显的降低, 这与全年的平均分布有所不同, 可能是在夏季地面臭氧浓度较低的月份北风或偏北风出现的频率较高造成的.

为了分析风速变化导致臭氧浓度变化的可能性, 将 2008 年全年风速划分为<0.5, 0.5 ~ 3, 3 ~ 6, 6 ~ 10, 10 ~ 15, 15 ~ 20 和>20 m s$^{-1}$ 七组进行统计分析. 图 4 给出风速频率及风速对应的地面臭氧平均浓度. 中山站风速主要集中在 0.5 ~ 15 m s$^{-1}$ 的范围内, 占总样本的 93.7%. 由图 4 可看出, 不同风速条件下地面臭氧浓度变化不大, 变化幅度小于 5 nmol mol$^{-1}$. 图 5 给出各月不同风速范围内地面臭氧浓度的分布特征, 各月地面臭氧浓度随风速的变化幅度也很小, 但在南半球的夏季(11, 12, 1 和 2 月), 当风速增大时地面臭氧浓度比风速较小时浓度有所增加, 说明在夏季

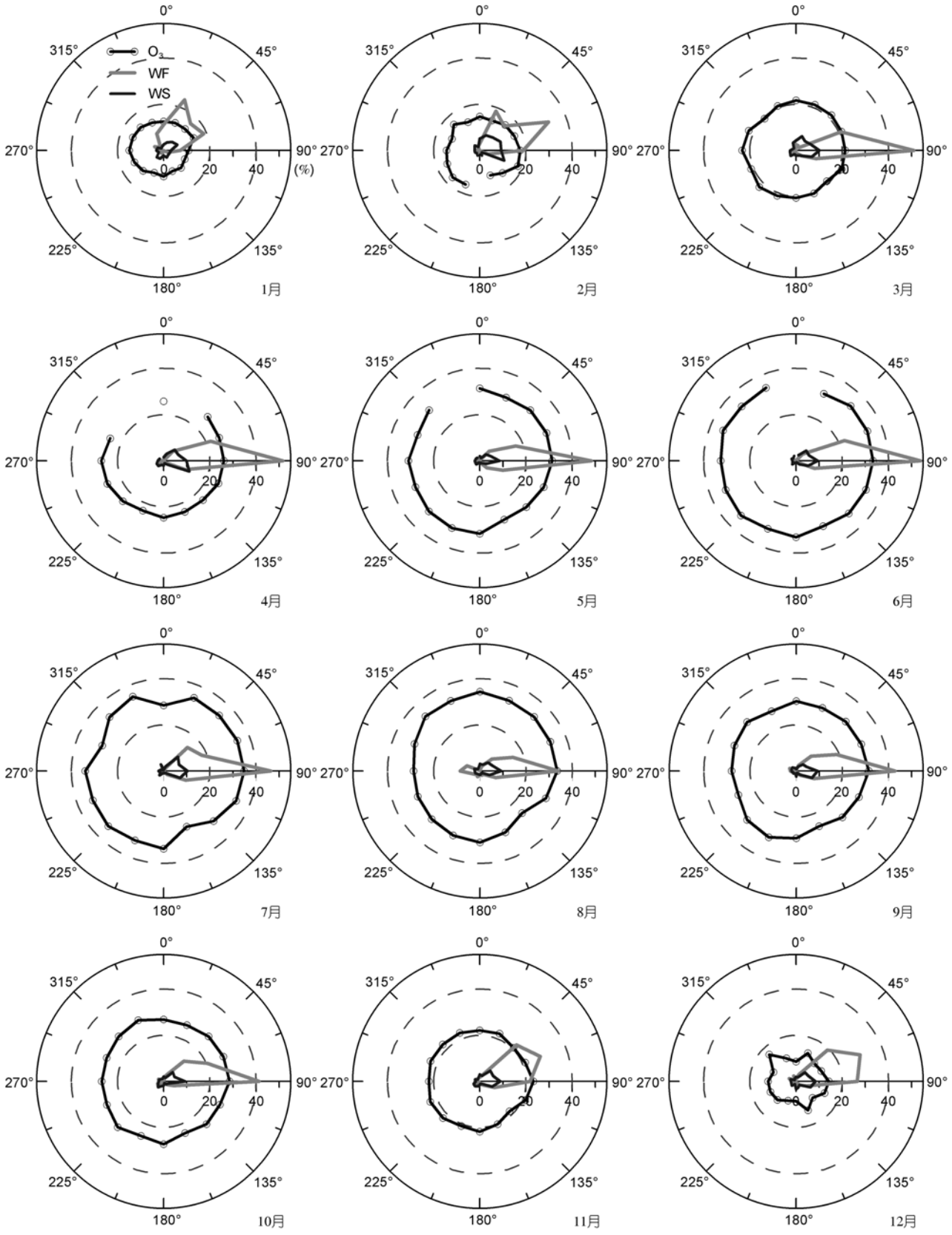



**图 3　2008 年各月风玫瑰图以及各风向对应的风速(WS)和地面臭氧($O_3$)浓度**

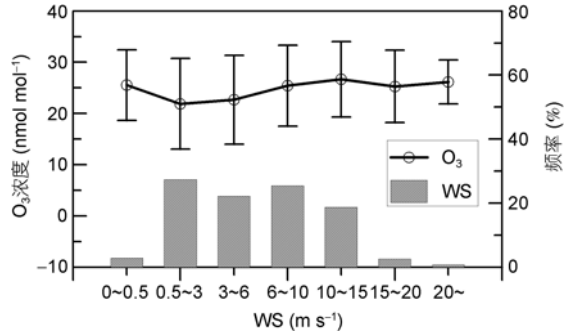



**图 4 2008 年不同风速等级出现频率及对应的地面臭氧($O_3$)浓度**

中山站周边地区的输送对地面臭氧浓度有一定的贡献，为了消除这种影响，我们也剔除了这部分数据，约占总样本的 1%.

经上述处理后，地面臭氧小时平均数据的完整率为 94.7%. 由此可见，中山站局地污染对地面臭氧浓度的影响非常小，可以认为处理后的地面臭氧数据能够代表中山站的本底浓度.

## 2.2 地面臭氧的季节变化

图 6 给出了处理后的中山站 2008 年地面臭氧小

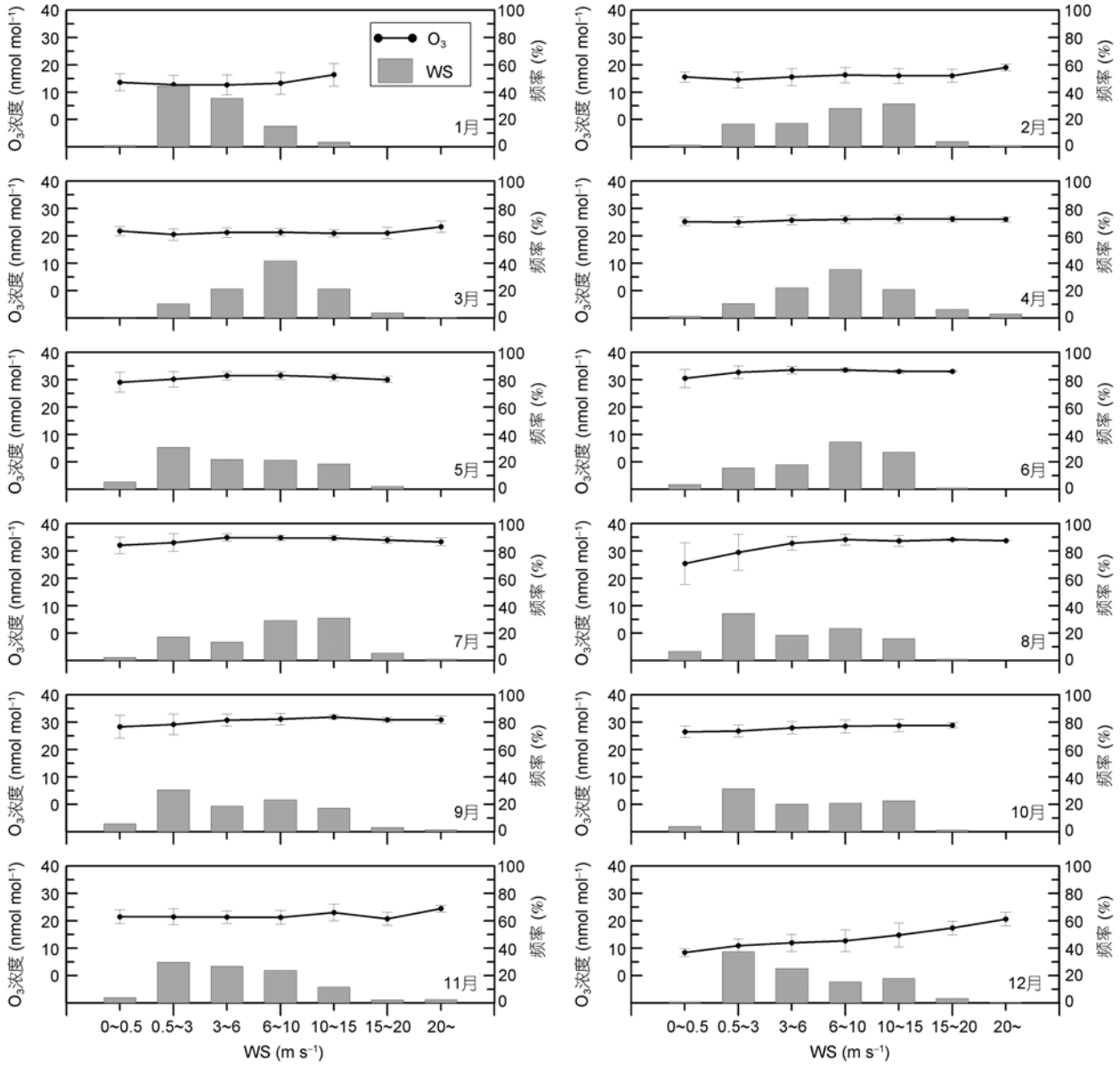



**图 5 2008 年各月不同风速等级出现频率及对应的地面臭氧($O_3$)浓度**

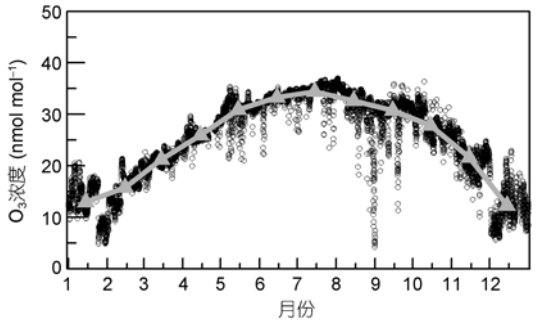



**图 6　中山站 2008 年地面臭氧($O_3$)小时平均浓度时间序列, 实线为月平均浓度**

时平均浓度的时间序列. 由图可知, 地面臭氧浓度具有明显的季节变化, 其显著特征是冬季高夏季低, 峰值出现在 7 月, 月平均浓度为 34.4 nmol mol$^{-1}$, 谷值在 12 月, 月平均浓度为 12.3 nmol mol$^{-1}$, 这与南极其他站点地面臭氧的年变化特征基本一致[7]. 南极地区氮氧化物等臭氧前体物浓度全年都比较低, 夏季太阳辐射较强, 紫外辐射对臭氧的破坏作用比光化学反应产生作用大得多, 因此南极地区夏季地面臭氧浓度较低[27]; 而冬季极夜期间没有太阳辐射, 且极夜前后期太阳高度角很低, 太阳辐射强度很弱, 因此冬季地面臭氧浓度较高.

图 7(a)给出了 2008 年中山站 Brewer 光谱仪测量的波长为 290~325 nm 的紫外辐射(UVB)逐日平均辐照度与地面臭氧日平均浓度的时间序列. 图中两条直线之间为极夜期间没有紫外辐射. 由图可见, 夏季紫外辐射对地面臭氧的产生和分解有着重要的作用. 从 3 月到极夜期间, 随着太阳辐射逐渐减弱, 地面臭氧浓度持续增加; 7 月末至 8 月初, 即日出开始阶段, 臭氧浓度达到最大, 随后开始减小, 这可能与极夜期间所积累的臭氧前体物随着日出而发生光化学反应导致地面臭氧在短时期内增加, 然后随着臭氧前体物反应减少, 紫外辐射对臭氧的破坏作用超过了光化学产生作用, 导致臭氧浓度开始下降. 图 7(b)给出了 UVB 与地面臭氧的相关系数. 紫外辐射与地面臭氧浓度呈负相关, 相关系数为–0.69. 由此表明, 紫外辐射对南极地面臭氧的分解破坏作用占主导地位, 这是由于南极地区污染较少, 缺少臭氧前体物, 因此光化学反应生成臭氧较少.

由图 6 可以看出, 在南极春季 8~9 月地面臭氧浓度出现了几次急剧降低的突变过程, 即南极臭氧损耗事件(ODE), 这可能与化学和动力过程有关. 为了揭示 ODE 的成因, 本文将臭氧浓度低于年平均浓度 50%作为臭氧损耗事件发生的判断标准. 中山站 2008 年主要有 2 次臭氧损耗事件(2008 年 8 月 29 日~9 月 1 日; 9 月 18~19 日), 持续时间较短. 目前, 溴族对臭氧的光化学反应消耗已得到了广泛的认知. 中山站位于普里兹湾东南沿岸, 具有发生 ODE 的地理条件. 通过分析中山站 2008 年发生 ODE 期间臭氧浓度与温度、风向、风速的关系(图 8)发现, 在 ODE 期间温度急剧下降至–30℃以下. 这种温度的剧烈降低有利于中山站北部开阔水域的结冰和冰面上冰花的形成, 在此过程中海水盐分中的溴化物能够气化释放出来, 导致局地空气中的溴化物浓度增加. 当 ODE 发生时, 风速很小, 一般在 3 m s$^{-1}$ 以下, 这种小风速条件有利于溴化物在局地堆积与本地的臭氧反应从而引起臭氧的损耗. 另外, 风向也有一个明显的转变, 由较为稳定的偏东风转为紊乱的风向, 偏西风出现的频率明显升高. 为了进一步解释 ODE 的成因, 我们利用气流后向轨迹模式对其进行分析. 图 9 给出

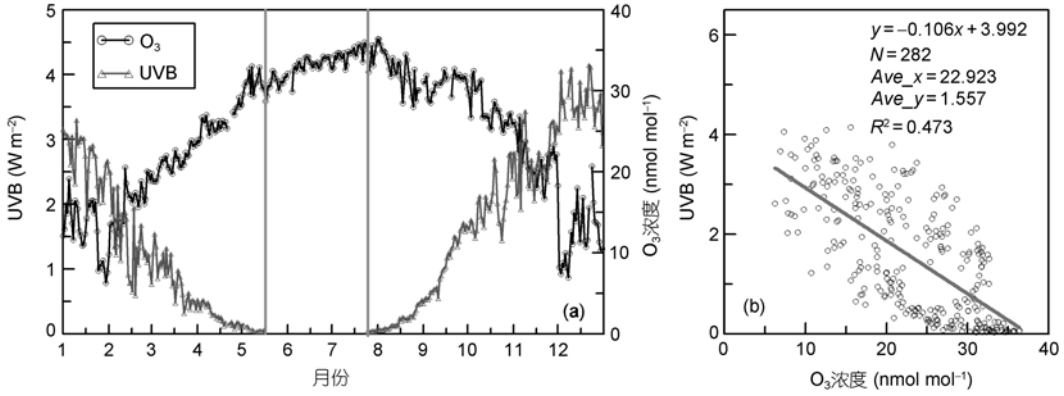



**图 7　2008 年中山站紫外辐射(UVB)和地面臭氧($O_3$)浓度的时间序列(a)以及两者的关系(b)**

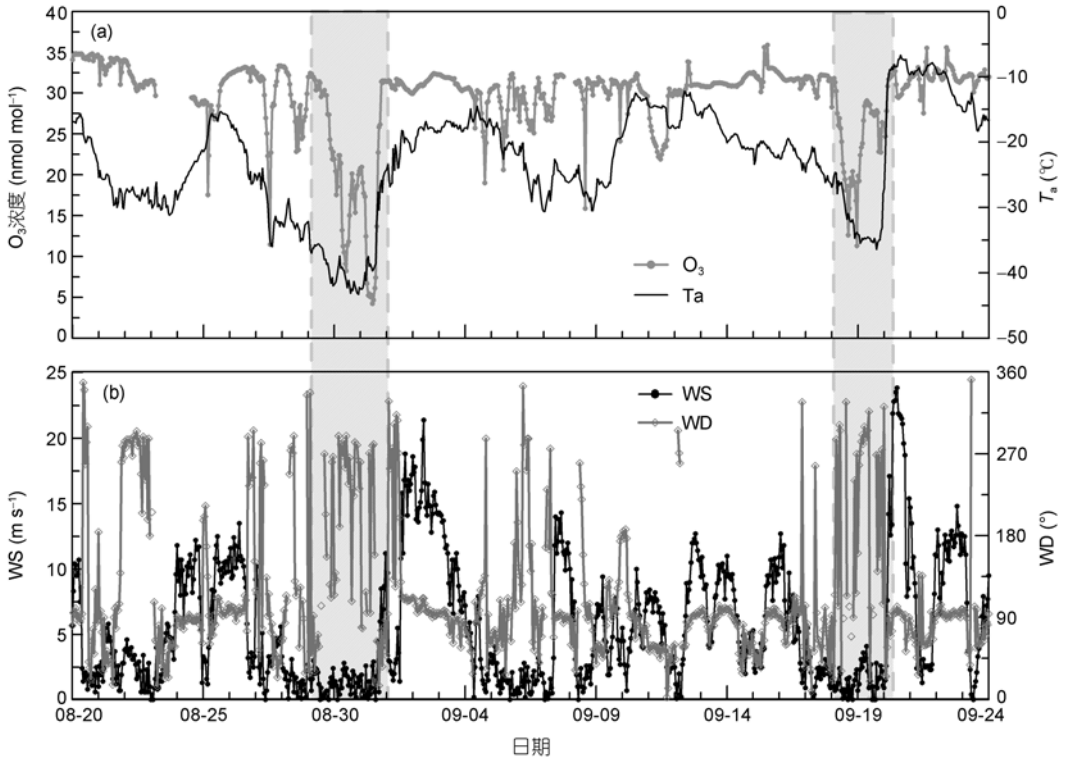



**图 8 2008 年 8 月 20 日~9 月 24 日中山站地面臭氧浓度与温度(a)、风速和风向(b)的时间序列**

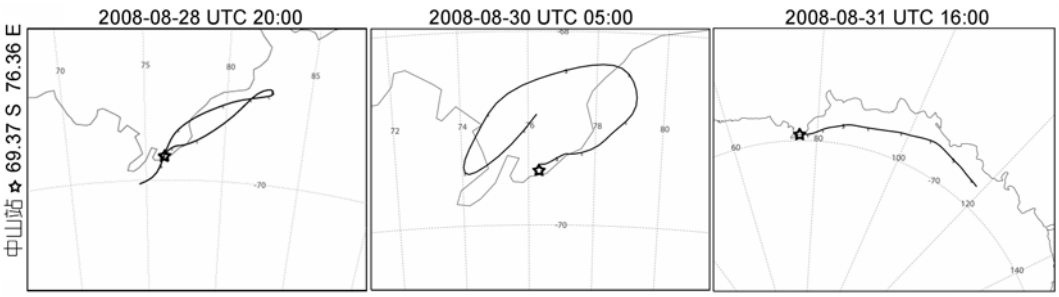



**图 9 2008 年 8 月 28~31 日中山站气流的后向轨迹**

了 2008 年 8月28~31 日中山站的 2 d 气流后向轨迹. 由图可知, ODE 发生前(8月28日20 时), 站区气流主要来自南极大陆沿岸地区, 当气流转为来自北部海洋时(8月30日5时), 臭氧浓度开始降低, 直至8月31日16时气流来向转为站区西部沿岸地区后, 臭氧浓度开始回升, 并恢复到接近同期值的浓度. 从 NECP 再分析资料的地面气温场(图 10)可以看出, 中山站 ODE 发生前(8 月 28 日), 站区北部海域的温度在 –30℃以上, 只有普里兹湾南部的埃默里冰架地区温度低于–30℃; 当 ODE 发生时(8月30日), 普里兹湾地区明显降温, 低于–30℃的区域向南扩张; 臭氧浓度开始恢复时(8月31日), 降温区域气温升至–30℃以上. 由此可见, ODE 事件与低温过程有关. 图 11 给出了 SCIAMACHY 卫星监测的南极海冰区大气 BrO 垂直总量分布. 可明显看出, 在南极海冰区存在几个 BrO 浓度高值中心, 且与温度低于–30℃的区域基本重合. 中山站北部是普里兹湾 BrO 高值区, 在气流的引导下, 高浓度的 BrO 扩散到站区, 从而导致了中山站 ODE 的发生. 另外, 我们还分析了 ODE 发生期间地面臭氧损耗与同期一氧化碳、紫外辐射等的关系,

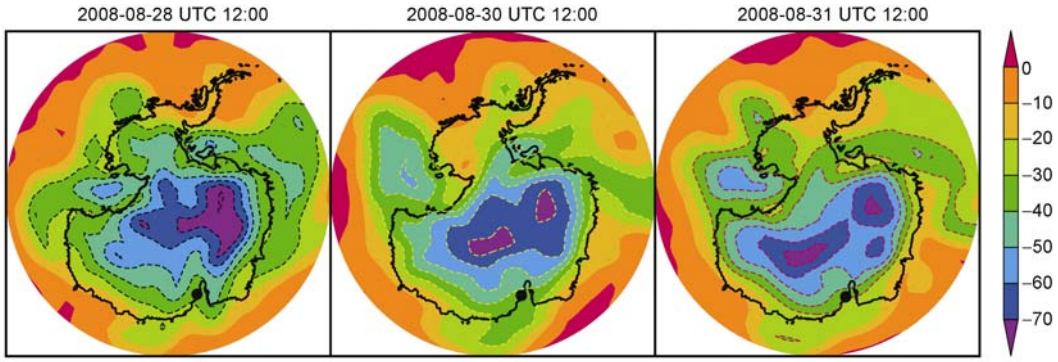



**图 10　2008 年 8 月 28~31 日 NCEP 再分析资料南极地区的地面气温场**

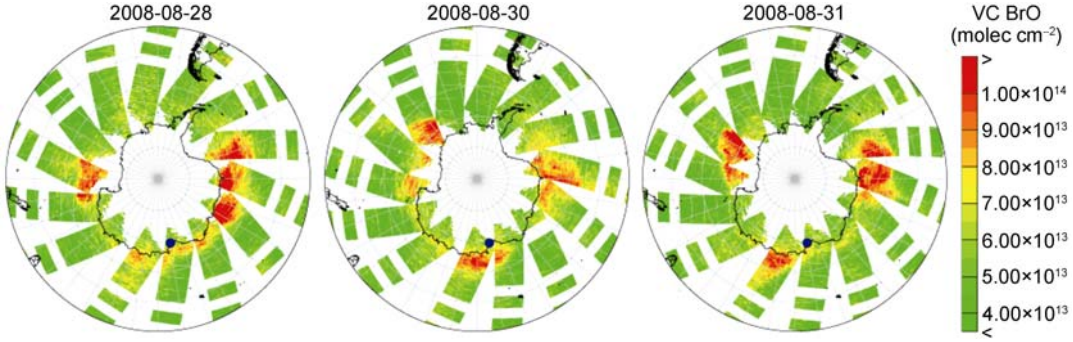



**图 11　2008 年 8 月 28~31 日南极海冰区 SCIAMACHY 卫星观测的 BrO 总量空间分布**

但并没有发现它们有明显的关联.

### 2.3　地面臭氧平均浓度

Helmiga 等人[7]指出, 年平均浓度比年中值浓度(将所有数据升序排列, 位于中间数据的浓度)受臭氧损耗或增加事件的影响更大, 用中值浓度与平均浓度比较, 可以在一定程度上反映平均臭氧浓度受损耗事件和增加事件影响的程度. 中山站 2008 年地面臭氧浓度平均浓度为 25.0 nmol mol$^{-1}$, 中值浓度为 26.3 nmol mol$^{-1}$, 两者之比为 0.95. 为了显示中山站地面臭氧本底浓度观测的代表性, 我们与南极其他几个站点(图 12)2008 年地面臭氧浓度进行了比较, 其中只有南极点站位于南极内陆, 其他站(昭和站, Neumayer 站, Arrival Heights 站)都位于沿岸地区. 表 1 列出了各站点 2008 年地面臭氧的平均浓度和中值浓度. 由表 1 可看出, 南极点站的臭氧浓度最高, 其中值浓度为 32.3 nmol mol$^{-1}$, 而沿岸站点的地面臭氧中值浓度均在 26 nmol mol$^{-1}$ 左右, 比南极点站低约 6 nmol mol$^{-1}$. 南极地区的地面臭氧浓度比北极地区平均低 5 nmol mol$^{-1}$ 左右[7], 这可能与北半球污染源较多有关. 另外, 从表 1 可以看出, 除南极点站外, Arrival Heights 站的平均浓度略高于其他沿岸站, 且

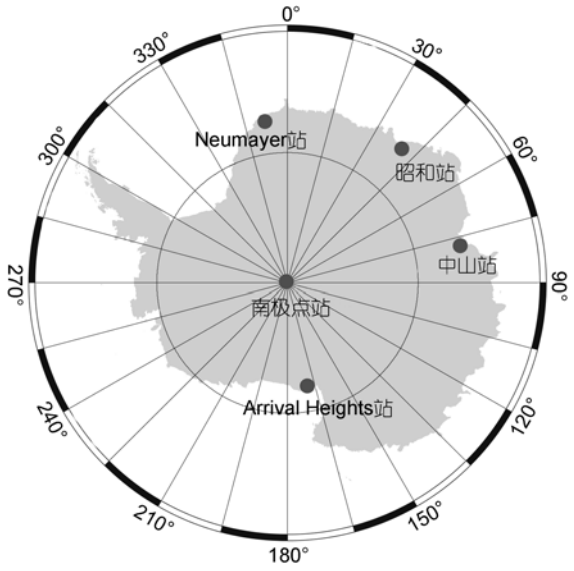



**图 12　南极地面臭氧($O_3$)观测站点分布**

表 1 南极各站地面臭氧浓度比较

| 站点 | 位置 | 海拔(m) | 平均浓度(nmol mol$^{-1}$) | 中值浓度(nmol mol$^{-1}$) | 平均/中值 |
|---|---|---|---|---|---|
| 南极点站 | 90.00°S, 24.80°W | 2841 | 30.8 | 32.3 | 0.95 |
| 昭和站 | 69.00°S, 39.58°E | 21 | 25.3 | 26.6 | 0.95 |
| Neumayer 站 | 70.65°S, 8.25°W | 42 | 24.9 | 26.0 | 0.96 |
| Arrival Heights 站 | 77.83°S, 166.2°E | 250 | 26.3 | 26.9 | 0.98 |
| 中山站 | 69.37°S, 76.36°E | 18.5 | 25.0 | 26.3 | 0.95 |

其平均浓度与中值浓度的比值高达 0.98. 表明地面臭氧平均浓度受损耗事件或增加事件影响的大小可能与海拔高度有关.

## 3 结论

利用 2008 年南极中山站地面臭氧和相关资料, 对地面臭氧的本底特征、季节变化以及臭氧损耗事件的成因进行了分析, 得出以下主要结论:

(1) 通过分析不同风向和风速条件下地面臭氧浓度的分布表明, 仅在 12 月在吹西北或东南偏南风时出现短时较高的浓度值, 没有显示中山站局地污染源对地面臭氧浓度有明显的影响. 根据风向和风速剔除可能的局地污染对地面臭氧浓度影响的样本, 仅占全年总样本的 1%左右, 表明观测数据能够代表中山站未受局地污染的本底浓度.

(2) 中山站地面臭氧浓度季节变化的主要特征是冬季高夏季低, 与南极其他站点变化特征基本相似. 地面臭氧浓度与紫外辐射呈负相关, 表明光化学破坏作用占主导地位.

(3) 2008 年春季出现了 2 次显著的臭氧损耗事件. 通过个例分析发现, 其成因与低温过程、小风速条件以及中山站北部 BrO 高值区有密切关系, 结合气流后向轨迹分析表明, 中山站地面臭氧损耗事件主要是受 BrO 的影响.

(4) 中山站 2008 年地面臭氧平均浓度为 25.0 nmol mol$^{-1}$, 中值浓度为 26.3 nmol mol$^{-1}$, 其值接近于与其他南极沿海站点, 略低于内陆南极点站.

以上初步得到的中山站地面臭氧浓度的本底特征和南极春季臭氧损耗事件的成因, 对分析其他温室气体的本底特征具有重要的参考意义.

**致谢** 中国气象局和国家海洋局极地办对中山站大气成分监测站的建设提供了有力的支持, 南极中山站考察队员在资料获取中做出了很大的贡献, 在此一并表示感谢. 另外, 特别感谢德国不莱梅大学环境物理研究所为本文研究提供 BrO 卫星资料.

## 参考文献

1 王明星. 大气化学. 第二版. 北京: 气象出版社, 1999. 340
2 王振亚, 李海洋, 周士康. 平流层中臭氧耗减化学研究进展. 科学通报, 2001, 46: 619–625
3 IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. In: Solomon S, Qin D H, Manning M, et al, eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 149–152
4 贾龙, 葛茂发, 徐永福, 等. 大气臭氧化学研究进展. 化学进展, 2006, 18: 1565–1574
5 Wang W C. Coupled effects of atmospheric $N_2O$ and $O_3$ on the earth's climate. Nature, 1979, 268: 589–590
6 徐晓斌, 丁国安, 李兴生, 等. 龙凤山大气近地层 $O_3$ 浓度变化及与其他因素的关系. 气象学报, 1998, 56: 560–572
7 Helmiga D, Oltmans S J, Carlson D, et al. A review of surface ozone in the polar regions. Atmos Environ, 2007, 41: 5138–5161
8 Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends. Atmos Environ, 2004, 38: 3413–3442
9 Wexler H, Moreland W B, Weyant W S. A preliminary report on ozone observations at Little America, Antarctica. Mon Weather Rev, 1960, 88: 43–54
10 Oltmans S J, Komhyr W D. Surface ozone in Antarctica. J Geophys Res, 1976, 81: 5359–5364
11 Oltmans S J. Surface ozone measurements in clean air. J Geophys Res, 1981, 86: 1174–1180

12 Kreher K, Keys J G, Johnston P V, et al. Ground based measurements of ClO and HCl in austral spring 1993 at Arrival Heights, Antarctica. Geophys Res Lett, 1996, 23: 1545–1548
13 Barrie L A, Bottenheim J W, Schnell R C, et al. Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic atmosphere. Nature, 1988, 334: 138–141
14 Fan S M, Daniel J J. Surface ozone depletion in Arctic spring sustained by bromine reactions on aerosols. Nature, 1992, 359: 522–524
15 Simpson W R, Glasow R, Riedel K, et al. Halogens and their role in polar boundary-layer ozone depletion. Atmos Chem Phys Discuss, 2007, 7: 4285–4403
16 Wagner T, Leue C, Wenig M, et al. Spatial and temporal distribution of enhanced boundary layer BrO concentrations measured by the GOME instrument aboard ERS-2. J Geophys Res, 2001, 106: 24225–24235
17 周秀骥, 郑向东, 陆龙骅, 等. 1993 年中山站地区“臭氧洞”和 UV-B 的特征分析. 南极研究, 1994, 6: 14–22
18 郑向东, 周秀骥, 陆龙骅, 等. 1993 年中山站南极“臭氧洞”的观测研究. 科学通报, 1995, 40: 533–535
19 郑向东, 陆龙骅, 周秀骥. 近六年中山站春季臭氧低值的观测结果分析. 极地研究, 1999, 11: 265–274
20 郭松, 周秀骥, 郑向东, 等. 南极中山站臭氧洞期间 $O_3$ 廓线的观测研究. 极地研究, 1997, 9: 78–82
21 陆龙骅, 卞林根, 程彦杰, 等. 南北极考察航线地面臭氧的观测. 科学通报, 2001, 46: 1311–1316
22 谢周清, 孙立广, 王新明, 等. 北极大气中汞亏损与海冰演变. 极地研究, 2004, 16: 221–228
23 Afe O T. Retrieval and observations of atmospheric BrO from SCIAMACHY nadir measurements. Dissertation for the Doctoral Degree. Germany: University of Bremen, 2005
24 Sinnhuber B M, Rozanov A, Sheode N, et al. Global observations of stratospheric bromine monoxide from SCIAMACHY. Geophys Res Lett, 2005, 32: L20810, doi: 10.1029/2005GL023839
25 周凌晞, 汤洁, 温玉璞, 等. 地面风对瓦里关山大气 $CO_2$ 本底浓度的影响分析. 环境科学学报, 2002, 22: 135–139
26 周凌晞, 温玉璞, 李金龙, 等. 地面风对瓦里关山大气 $CH_4$ 本底浓度的影响分析. 应用气象学报, 2004, 15: 257–265
27 Schnell R C, Liu S C, Oltmans S J, et al. Decrease of summer tropospheric ozone concentritions in Antarctica. Nature, 1991, 351: 726–729