

1993年春季南极中山站上空 大气臭氧的观测分析*

孔琴心 刘广仁 王庚辰

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 利用球载电化学 O_3 探空仪于 1993 年南半球春季在南极中山站测量了 O_3 和温度垂直廓线, 三次观测到 O_3 柱总量 $< 220 \text{ Du}$ 的低值, O_3 浓度减少从 9 月开始, 9 月中旬~10 月中旬达到最大。典型 O_3 垂直廓线表明, O_3 量损失最大区域在高度 13~23 km 之间, 此高度与 PSCs 和火山气溶胶的存在高度有很好的对应关系。本文给出观测结果及初步分析。

关键词 臭氧柱总量 臭氧分压垂直廓线 大气温度 南极臭氧洞

1 引言

南极 O_3 洞系指南极大气 O_3 层的一种季节性现象, 即在南极春季, 南极大陆上空气柱 O_3 总量急剧下降, 形成一个面积与极地涡旋相当的气柱 O_3 总量很低的地区。1985 年首先由 Farman 等人^[1]在分析南极哈利湾站(Hally Bay)春季 O_3 总量资料时发现, 随后美国雨云 7 号(Nimbus-7)卫星探测的 O_3 资料亦证实了 O_3 洞的存在。由于大气 O_3 层是地球生物和人类免受过多紫外线伤害的天然保护伞, 南极 O_3 洞的发现引起了全世界的震惊, O_3 问题成为当代三大环境问题之一受到全球普遍重视。近期研究表明, 大气 O_3 浓度的变化依赖于发生在平流层中的动力、化学和辐射过程之间的复杂耦合和反馈。人类活动向大气排放氯氟烃(CFCs)等化学物质逐年增加和南极特定的地貌及大气环境是南极 O_3 洞形成的基本原因^[2], 虽然科学家已提出了不少有关南极 O_3 洞形成的理论, 但是仍存在许多不确定性, 需要加强综合观测和研究, 如参与平流层 O_3 化学关键性成分浓度及分布的探测, 发生在三种气溶胶(硝酸三水合物、冰晶和硫酸盐)上多相化学反应机理, 以及多种微量化学成分的动力输送过程的研究等等。大气 O_3 还是自然变率相对较高的一种大气微量成分, 因此, O_3 洞变化也必然受到太阳活动、火山爆发和大气环流等多因素的干扰和制约, 使问题变得更加复杂, 最近几年南极 O_3 洞的面积、深度和维持的时间有扩大和上升趋势^[3]。对此, 各国学者正在进行严密的跟踪和监视。

我们于 1993 年首次在南极中山站开展了球载大气 O_3 垂直分布的探测, 本文将给出春季 O_3 洞期间的观测结果并对结果进行初步分析和讨论。

1995-05-04 收到, 1995-08-15 收到修改稿

* 南极考察科学研究“八五”计划支持项目

2 观测

1993 年 9 月~11 月在南极中山站(69°22′24″S, 76°22′44″E)共施放 O_3 探空 12 次, 其中有 4 次由于技术故障和放球操作不当, 未能获得完整的剖面资料。放球时间一般选择在晴好天气的中午, O_3 探测系统包括 O_3 探空仪、地面接收装置和资料处理系统三大部分, 由中国科学院大气物理研究所和空间科学与应用研究中心共同研制。 O_3 探空仪属于 C-I 电化学型, 载球为 1500 g 乳胶球, 飞行高度 0~30 km, 探空仪除提供飞行途途 O_3 垂直分布资料外, 还同时提供气压和温度廓线。 O_3 、温度和气压传感器输出信号经调频, 以 400 MHz 为载频发送到地面, 地面接收系统经放大、混频、鉴频和噪声控制等处理后送入数据处理系统, 数据处理系统完成测量数据的实时采集和自动处理, 给出气压、温度、 O_3 分压和 O_3 体积混合比垂直分布图, 原始资料和计算结果一并存入软盘保存。气球飞行速度为 300 m/min 左右, 探测数据的高度分辨率约为 50 m。为了保证 O_3 测量精度, 每个探空仪在飞行之前用自制标准 O_3 源或带内标源的 49/ps 型紫外 O_3 分析仪进行标定, 在资料处理过程中还将进行本底电流和泵效订正^[4,5]。 O_3 浓度测量精度为 10%~15%, 主要误差来自泵效、反应效率测试误差和电路系统的不稳定性。气压和温度探测精度分别为 $\pm(1\sim2)$ hPa 和 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

3 结果和讨论

3.1 大气 O_3 柱总量

利用 O_3 体积混合比随高度的分布, 对高度进行积分, 假定气球爆炸高度以上 O_3 体积混合比为常数, 可以从探测的 O_3 体积混合比垂直分布廓线计算出 O_3 柱总量。9 月至 11 月初在中山站有三次测量到 O_3 柱总量 ≤ 220 Du 的低值, 图 1 给出探空仪积分 O_3 柱总量及该日地面 Brewer O_3 仪日均 O_3 柱总量观测值^[6], 显然可见, 两者有很好的—致性, 最大偏差为 10.9%。

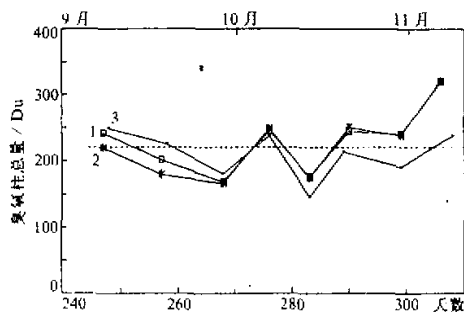


图 1 O_3 柱总量观测比较

(1) 探空仪(中山站); (2) Brewer(中山站);
(3) Dobson(昭和站)

为了比较起见, 图 1 中还绘出了与中山站纬度相近的昭和站(69°S, 39.35°E)相应日均 O_3 柱总量观测值^[7], 昭和站和中山站地面 O_3 柱总量观测值分别由国际公认的标准仪器

Dobson 和 Brewer O_3 仪获得。昭和站与中山站虽然地理纬度相近, 但是分别处于极地涡旋的边缘, 两地日均 O_3 柱总量发生偏离是完全可以理解的, 尤其在极涡溃于崩溃期间, 受极地涡旋的摆动和伸缩动力过程影响同日内两地 O_3 总量可以相差甚大。值得一提的是, 从图 1 中我们看到, 在 O_3 洞最严重的期间两地 O_3 观测值却十分接近, 表明

此时极地涡旋覆盖面积大且比较稳定。

表 1 给出观测的 O_3 柱总量及相对损失率, 相对损失率是以 11 月 2 日测量到的最大柱总量值作为本底值求出。

表 1 O_3 柱总量观测值和相对损失率

观测日期	O_3 柱总量 / Du	相对损失率 / %	P_{O_3} (70 hPa) / mPa	P_{O_3} (200 hPa) / mPa	T (70 hPa) / °C
9 月 4 日	241.5	24.4	13.1	5.81	-74.7
9 月 14 日	200.9	37.1	5.82	3.45	-75.4
9 月 25 日	167.8	47.4	2.62	5.36	-76.5
10 月 3 日	244.4	23.5	11.4	4.40	-66.5
10 月 10 日	175.0	45.2	4.65	3.89	-75.9
10 月 17 日	244.1	23.6	8.81	4.77	-59.8
10 月 26 日	239.7	24.9	6.32		-60.9
11 月 2 日	319.3	0	20.5	4.15	-47.9

从表 1 可以看出, 9 月 25 日 O_3 柱总量损失率最高, 达到 47.4%, 10 月 10 日和 9 月 14 日 O_3 柱总量值也有较大减少, 其余天数 O_3 柱总量值变化不大, 一般减少量在 23%~25% 之间, 纵观 9~11 月间中山站上空 O_3 总量, 不难发现逐日之间有较大的波动, 假定将 O_3 总量 ≤ 220 Du 作为统计 O_3 洞面积的一个指标, 那么我们可以说 9~11 月间, 中山站时而在 O_3 洞内, 时而又在 O_3 洞之外。据最近报道, 南极极点站在 1993 年春季观测到 O_3 柱总量为 91 Du 的最低值^[8], 可见其 O_3 洞的深度是大大超过中山站。出现上述现象是由于中山站的地理纬度所造成, 中山站位于极圈附近, 处于环极极涡的边缘, 随着天气形势的变化, 上空气团常处于受干扰和移动的不稳定状态。输送过程对中山站上空 O_3 的空间分布起着重要的作用。表 1 中还列出了 70 hPa 和 200 hPa 等压面上 O_3 分压值, 不难发现, 随着 O_3 柱总量的变化, 相应 70 hPa 上 O_3 分压值 P_{O_3} 的起伏远大于 200 hPa 的相应值。观测期间 O_3 总量变化 1.9 倍, 前者分压变化 7.8 倍, 后者分压仅变化 1.7 倍, 由此可见, 70 hPa 高度层对 O_3 变化的反应十分灵敏, 我们可以将 70 hPa 等压面作为 O_3 浓度变化的一个敏感区域来研究。

3.2 O_3 分压垂直分布的特征

图 1 给出中山站上空春季 O_3 洞期间典型的大气 O_3 分压垂直廓线, 为了分析垂直结构特征, 我们将 4 月 18 日非 O_3 洞期间的一条大气 O_3 分压垂直廓线重叠在上, 从图上我们可以直观地看到, O_3 分压减少最大的区域在 13~23 km 范围, 其中以 16~20 km 最为严重, 南极极点站在 10 月 6 日和 10 月 12 日均观测到在 14~19 km O_3 分压出现零的记录, 虽然极点站与中山站地理纬度相差很大, 可是中山站上空 10 月 10 日观测到的 O_3 耗减, 在时间和空间分布上与其吻合得很好, 说明两地 O_3 损失可能有相同的机理, 在 10 月 10 日前后极地涡旋的覆盖面积可能达到了中山站上空, 并且持续的时间较长。

利用均相(气相)光化学理论计算人类排放 CFCs 在平流层光解破坏 O_3 的最有效区域应该在 35~40 km 范围, 这与实际观测到的 O_3 损失范围不符, 但是基于极地平流层

云以及极涡中 ClO_x , NO_2 等微量成分的观测, 人们发现在南极漫长的严寒极低气温下, 在极地平流层云中多相光化学反应是形成南极 O_3 洞的重要过程。观测表明南极极地平流层云的高度在 15~22 km 之间, 它们与直接探测到的 O_3 损失极大区的高度十分吻合, 南极中山站 O_3 洞期间的 O_3 浓度垂直分布特征在某种程度上也支持了这种 O_3 洞形成的理论。

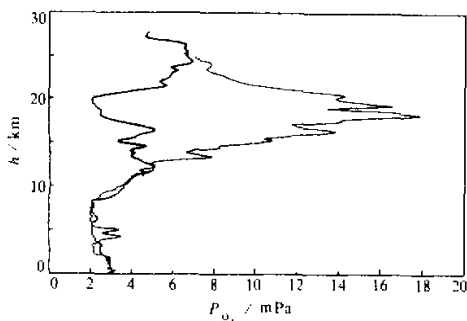


图 2 不同高度 O_3 浓度耗损的比较

细实线: 1993 年 4 月 18 日;

粗实线: 1993 年 10 月 10 日

分析图 2, 我们发现在 O_3 洞期间 O_3 减少可以仔细划分成两个区域, 第一个损失区在 16~22 km, O_3 损失最严重, 第二个损失区在 13~16 km, 这个区域 O_3 的减少可能与皮纳图博火山爆发向平流层喷射的硫酸盐等气溶胶粒子有关。据 McMurdo 站(78°S)气溶胶粒子气球测量, 在 12~16 km 区域, 1993 年 9 月亚微米粒子的浓度仅比 1992 年 9 月减少了 25%^[8], 中山站 1993 年激光雷达也观测到气溶胶浓度分别在 12 km 和 25 km 呈双峰结构^[9]。

可见, 尽管皮纳图博火山气溶胶在 1993 年有所衰减, 但是对该层的影响仍不可忽视, 12~16 km 高度是火山气溶胶浓度最大层, 在该层水气含量比平流层中上层要高得多, 计算表明, 硫酸盐气溶胶的凝结温度比 NAT 凝结温度高, 这样, 它可以比 NAT 更早地凝结, 更晚地蒸发, 火山气溶胶的存在可能会改变多相化学反应的效率, 使 PSCs 中的多相化学反应变得更加复杂, 尚有许多不确定性有待研究。

图 3 a, b, c, 分别为 9 月 14 日、10 月 10 日和 10 月 17 日三次典型的探空 O_3 垂直廓线, 它们形态各异, 但又有共同之处。9 月 14 日和 10 月 10 日两次测量 O_3 总量分别为 200.9 Du 和 175.0 Du, 在高度 3 km 以下, 后者 O_3 分压大于前者, 但是自 12.5 km 以后直到 22 km 情况相反, 10 月 10 日有两个 O_3 损失区, 而 9 月 14 日, 13~16 km 的第二损失区不如 10 月 10 日明显, 这反映了中山站上空大气物理和化学状态的时空非均匀性。10 月 17 日 O_3 分压垂直廓线是一个 O_3 洞正在被堵塞的例子, 这天 O_3 总量为 244.1 Du, 超出了人为 O_3 洞的定义值(220 Du), 在 15~20 km 范围内, O_3 分压

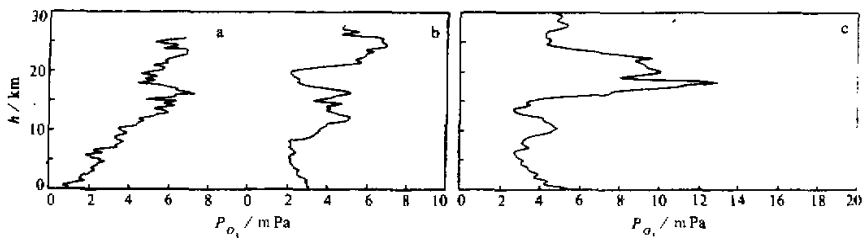


图 3 不同形态的 O_3 分压垂直分布廓线

(a) 1993 年 9 月 14 日; (b) 1993 年 10 月 10 日; (c) 1993 年 10 月 17 日

虽然还没有恢复到正常值,但是已呈现出明显的峰态,而且在 10 km 附近还出现了第二个极大。

O_3 洞期间,由于 O_3 损失随高度分布是非均匀的,使整层 O_3 垂直分布廓线形态发生了明显的变化,一般 O_3 浓度峰值从 70 hPa 高度抬升到 30 hPa,这是 O_3 洞期间垂直分布的另一个特征。

3.3 温度廓线特征

南极 O_3 洞的成因及其变化趋势与南极冬季和春初上空大气温度有十分密切的关系。由于长期稳定的南极环极涡阻塞低纬度暖气团的交换使南极冬季和早春平流层气温极低,甚至比北极低 $10\sim 15\text{ K}$,这是导致北极和南极 O_3 量耗减差异的一个重要因素。1993 年冬季,在中山站上空 8 月 20 日球载探空观测到 -87°C 的低温。根据 Hanson 等人的计算方法,我们计算了中山站上空 1 类极地平流层云(即 NAT)的凝结温度,在 50 hPa 高度约为 -78.3°C (假定 HNO_3 混合比为 5×10^{-9} , H_2O 混合比为 4.5×10^{-6}),1993 年 6 月初~8 月初冬季观测到中山站上空平流层最低温度几乎都 $\leq -78^\circ\text{C}$,最低气温高度一般在 17~20 km 之间,这个高度也正好与春季 O_3 耗减层相吻合。中山站激光雷达在 1993 年观测结果表明 5 月末~8 月初,IBC 最大,18 次探测中 $\text{IBC} > 1\times 10^{-3}(\text{Sr}^{-1})$ 占 83%^[9],从而证实中山站上空 NAT 大约从 5 月末开始形成,8 月初开始蒸发,与极点站相比,时间大约提前了半个月。

图 4a、b、c 分别代表中山站冬季、仲春和春末的三条典型温度廓线,它们之间有很大差别,冬季温度很低,15~20 km 高度气温十分稳定,仲春温度有所回升,15~20 km 温度上升缓慢,20 km 以后温度迅速上升,春末气温迅速升高,从 15 km 到 20 km 这 5 km 厚度温度上升近 20°C 。由此可以认为,随着阳光普照,从 11 月开始中山站上空平流层下部气温将迅猛回升,极涡不再阻碍来自低纬度含有高 O_3 浓度的气团的填补, O_3 洞将逐渐消失。

表 1 的最后一列还给出了 70 hPa 等压面上的温度值,显然,温度与 O_3 总量之间存在十分好的正相关,其相关系数高达 0.89,作为一个例子,10 月 10 日与 10 月 17 日相比,70 hPa 上 O_3 分压从 4.65 mPa 上升到 8.81 mPa,随继温度从 -75.9°C 上升到 -59.8°C ,在短短的几天内温度升高了 16.1°C ,可称得上是一次爆发性增温了。

4 小结

(1) 在 O_3 洞期间, O_3 柱总量有明显减少,最低观测到 167.8 Du 的低值, O_3 损失约 47%,有理由认为,1993 年春季,中山站观测到 O_3 洞现象。

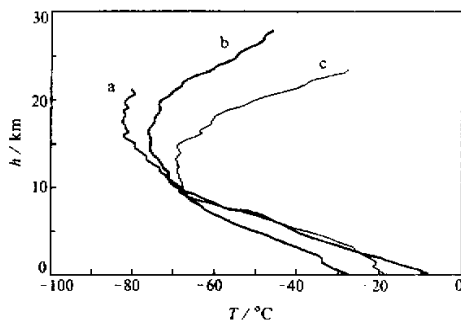


图 4 温度廓线的变化

粗实线: 1993 年 8 月 26 日;

虚线: 1993 年 10 月 10 日; 细实线: 1993 年 11 月 2 日

(2) 典型的 O_3 分压垂直廓线表明 O_3 浓度的最大耗减出现在高度 13~23 km 范围内,但在这一高度范围内 O_3 量的耗减并不是均匀的,仔细分析可以发现存在 16~20 km 和 13~16 km 两个较大的损失区,以 16~20 km 区间 O_3 浓度损失最严重。

(3) 1993 年南极中山站上空 O_3 柱总量 ≤ 220 Du 的日期大约在 9 月中旬至 10 月中旬,从 11 月初开始,气温和 O_3 柱总量均有明显回升。

(4) 观测结果表明, O_3 柱总量和 70 hPa 上的 O_3 分压值分别与 70 hPa 等压面上的气温有很好的正相关。

(5) 1993 年冬季在中山站上空约 17 km 高度上观测到 -87°C 的低温,从 6 月初~8 月底中山站上空最低气温往往处于 NAT 的凝结温度之下。激光雷达观测证实在此间有 PSCs 存在,极地平流层云和火山气溶胶存在的高度与春季 O_3 洞期间 O_3 浓度的最大耗损高度有很好的对应关系。

参 考 文 献

- 1 Farman, J.C., B.G. Gardiner and J.D. Shanklin, 1985, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal $\text{ClO}_x / \text{NO}_x$ interaction, *Nature*, **315**, 207~210.
- 2 Solomon S., 1990, Progress towards a quantitative understanding of Antarctic ozone depletion, *Nature*, **347**, 347~354.
- 3 Bojkov, R.D., 1995, The international ozone assessment-1994, *WMO Bulletin*, **44**, 42~50.
- 4 孔琴心等, 1992, 大气 O_3 垂直分布的电化学测量, *大气科学*, **16**(5), 636~640.
- 5 Wang Gengchen et al., 1989, Observation technique for ozone distribution in the stratosphere, 22 MAX global character research of solar-terrestrial system, Special issue I, 230~235.
- 6 郑向东等, 1995, 1993 年中山站南极“臭氧洞”的观测研究, *科学通报*, **40**(6), 533~535.
- 7 Ozone Data for the World, 1993, Published by the Atmospheric Environment Service, Department of the Environment, in co-operation with the World Meteorological Organization, **34**(5), 1066~1068.
- 8 Hofmann, D.J. et al., 1994, Record low ozone at the south pole in the spring of 1993, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 421~424.
- 9 孙金辉等, 1995, 激光雷达探测南极平流层云, *南极研究*, **1**(1), 44~49.

Observations and Analyses of Atmospheric Ozone over Antarctic Zhongshan Station in the Spring of 1993

Kong Qinxin, Liu Guangren and Wang Gengchen

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Using an electrochemical ozonesonde, we measured the vertical profile of ozone and temperature over Antarctic Zhongshan Station in the spring of 1993. We observed total ozone less than 220 Du three times. The reduction of ozone concentration begins in September, reaching maximum from mid September to mid October. The vertical distribution of the typical ozone indicates that the altitude among 13~23 km is the largest range for ozone losses. This height has a good corresponding relationship with the existing height of the Polar Stratospheric Clouds (PSCs) and volcanic aerosol. The paper presents observation results and fundamental analyses.

Key words total ozone vertical profile of ozone partial pressure atmospheric temperature
Antarctic ozone hole