

# 南极臭氧洞的研究

陈善敏 贾朋群

(气象科学研究所南极气象研究室)

## 摘 要

南极臭氧总量在晚冬和早春减少了30—40%，形成一个“臭氧洞”。本文概述了一些作者对这一观测事实给出的解释，以期使读者对此问题有一个全面的认识。无论是从光化学角度还是从动力学角度，给出臭氧变化的机制都是初步的，但这是认识这种现象的第一步。作者认为将光化学和动力学两种观点结合起来，做全面的分析，是问题完满解决的途径。

## 一、引言

最近，科学家们注意到，从本世纪七十年代以来，南极地区大气的臭氧含量，在每年的南极春季即10月份前后，突然减少了30—40%。美国国家航空和宇宙航行管理局(NASA)的研究人员<sup>[1]</sup>，根据雨云7号(Nimbus-7)极轨卫星上臭氧总量绘图光谱仪(TOMS)的观测，得出南极臭氧减少的区域像一个空洞，称其为南极臭氧洞(Ozone hole)。他们还发现，近几年来臭氧洞的面积在逐渐扩大，其范围相当于美国本土的面积。目前，对臭氧洞产生的原因和机制尚不清楚，但这一观测事实引起了大气科学界的广泛关注。

1985年5月英国南极局自然环境研究委员会Farman等人<sup>[2]</sup>，在英国《自然》杂志上首先发表了他们对南极臭氧的观测和分析研究结果。指出了近几年南半球春季，南极臭氧总量明显减少的观测事实。随后《自然》杂志又刊登一些文章，介绍了其他有关南极臭氧的观测结果以及对这一现象的分析。一些国际学术会议，也把南极臭氧的变化问题作为一个专门课题进行讨论。据美国科学基金会的通告报道，1986年南极春季以前，美国已派出13名科学家组成专门探险队，赴南极对这一问题进行专项观测和研究。

## 二、南极臭氧减少的观测事实

图1是Farman<sup>[2]</sup>给出的英国在南极

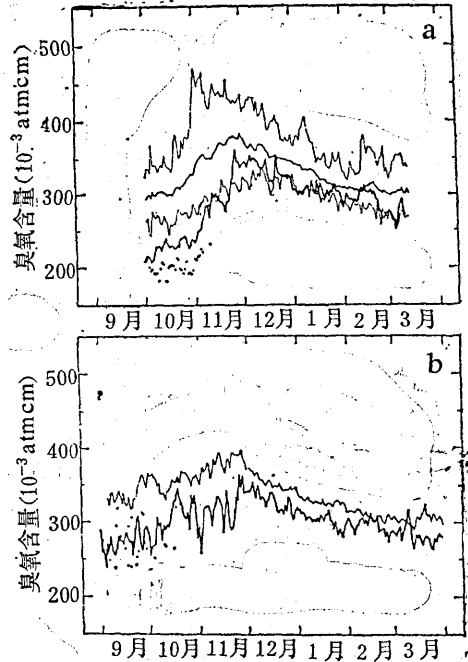


图1 哈利湾(a)和阿根廷岛(b)逐日臭氧总量

图a中三条细线为1957—1973年的臭氧总量平均值和极端值，图b中细线为1957—1973年臭氧总量的平均值；粗线为1980—1984年的平均值；点区为1984年9月到10月中旬的观测结果

的哈利湾(Halley Bay 76°S, 27°W)和阿根廷岛(Argentine Islands 65°S, 64°W)两个考察站的臭氧观测结果。纵坐标为大气中臭氧总量，单位是 $10^{-3}\text{atm}\cdot\text{cm}$ ，称之为大气厘米，是表示大气中气体质量的单位，反映某种气体在标准大气状态下，在

单位截面积气柱中所占的厘米高度<sup>[3]</sup>。由图可看出, 1980—1984年10月份(南极的春季)臭氧总量要比3月份(南极的秋季)的值小得多, 而这一特点是1957—1973年的观测资料中所没有的。哈利湾站1980—1984年4个春季臭氧总量的平均值明显减少, 甚至低于七十年代中期以前的极端最低值。特别是在1984年10月份, 哈利湾站观测到的臭氧总量在 $200 \times 10^{-3} \text{atm} \cdot \text{cm}$ , 有的还要小, 而七十年代中期以前臭氧总量的平均值在 $300 \times 10^{-3} \text{atm} \cdot \text{cm}$ 。同样, 阿根廷岛站也有类似的特征。这反映了, 近几年来南极地区大气的臭氧总量在春季减少了30—40%。

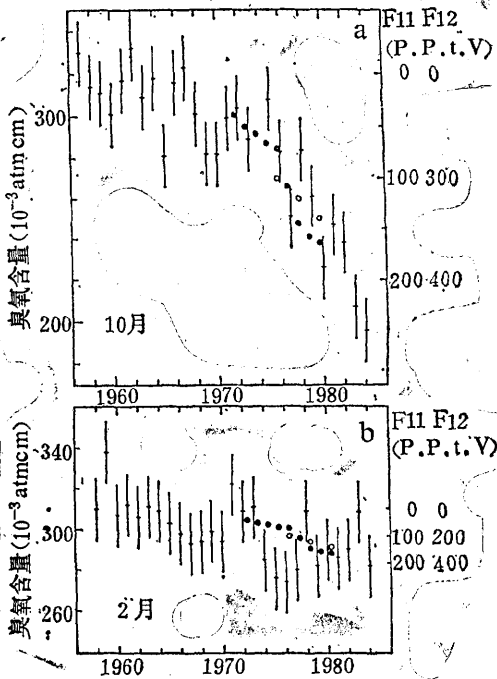


图2 哈利湾站历年10月(a)和2月(b)臭氧总量的平均分布

图2是哈利湾站历年10月和2月臭氧总量的月平均分布图。图右边坐标为南半球的 $\text{CFCl}_3$  (即氟里昂11 (F11), 图中用·表示) 和 $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  (即氟里昂12 (F12), 图中用○表示) 的测量值, 其单位为p.p.t.v.。由图可见, 10月份臭氧总量在七十年代中期以前, 为 $300 \times 10^{-3} \text{atm} \cdot \text{cm}$ 左右, 而其后

有明显的减少趋势, 到1984年10月份平均臭氧总量已减少到 $200 \times 10^{-3} \text{atm} \cdot \text{cm}$ 以下。2月份臭氧总量逐年的变化没有上述特点。图中还给出了七十年代以来, 南半球氟里昂浓度的变化值, 从中可见氟里昂含量的增加与臭氧总量的减少趋势是一致的。大气中氯氟烃对臭氧起破坏作用, 是引起臭氧减少的主要原因之一。

Stolarski等人<sup>[4]</sup>利用雨云7号卫星探测资料, 分析了南极春季臭氧减少的观测结果。图3为1984年10月13日南极及其附近地区的臭氧总量分布图, 图中臭氧总量的单位为DU (Dobson Units), 称作多布森单位 ( $1\text{DU} = 10^{-3} \text{atm} \cdot \text{cm}$ ), 每隔30DU绘一条等值线。由图可见臭氧洞形象的分布状



图3 1984年10月13日雨云7号卫星上TOMS测量的臭氧总量分布

况, 臭氧总量 $<210\text{DU}$ 的范围已占南极相当大的面积, 臭氧总量在臭氧洞中心附近已减少到180DU以下。

图4为用雨云7号卫星TOMS测量的南半球1979—1985年10月份月平均臭氧总量分布图, 单位为DU。每张图的中心为南极极点; 图外围虚线为 $30^\circ\text{S}$ ; 图正上方为 $0^\circ$ 经度。由图可见, 历年10月份南极附近臭氧总量均为低值区的臭氧洞, 从其变化趋势分析, 1979年臭氧总量低值区的中心为270DU, 1980年出现了240DU的闭合中心, 以后低值区的范围逐年扩大, 臭氧总量

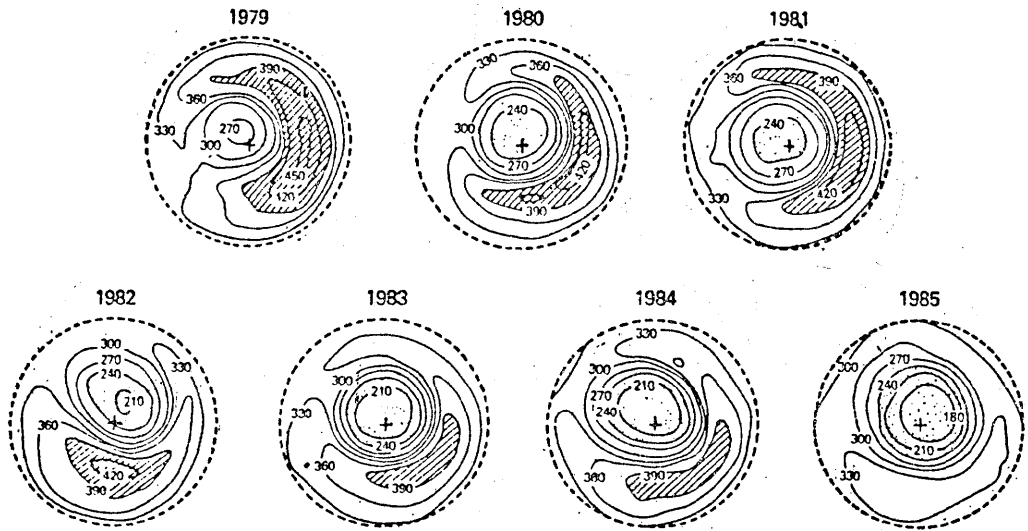


图4 南半球1979—1985年10月份月平均臭氧总量分布

逐年减少。1985年10月份月平均臭氧总量的低值范围扩展到最大，中心已减少到180DU以下。从中我们可清楚地看出，近几年来臭氧洞有逐渐加强、范围逐渐扩大的趋势。

Stolarski 还根据雨云7号卫星上TOMS探测的1979—1985年臭氧总量的资料，给出了哈利湾、昭和(Syowa 69°S, 39°E)、阿蒙森-斯科特(Amundsen-Scott 90°S)三个南极站，历年10月份月平均臭氧总量值，见表1。表中还列出了TOMS所测到的月平均臭氧总量的极小值和极大值。单位均为DU。从表中可以看出，TOMS探测的臭氧总量最低值，由1979年的259DU减少到1985年的152DU。另

表1 三个南极站10月份臭氧总量平均值以及TOMS探测的极小值与极大值

年	哈利湾站	昭和站	阿蒙森-斯科特站	极小值	极大值
1979	273 ± 19	367 ± 47	266 ± 25	259	458
1980	232 ± 11	276 ± 22	218 ± 9	215	433
1981	244 ± 12	312 ± 30	223 ± 9	219	449
1982	221 ± 12	240 ± 49	220 ± 22	205	432
1983	199 ± 13	239 ± 32	182 ± 8	178	414
1984	190 ± 8	245 ± 24	187 ± 14	181	404
1985				152	351

外，TOMS探测的哈利湾臭氧总量历年变化的特征，与Farman等人分析哈利湾地面探测的臭氧总量历年变化是非常一致的。

表2给出了雨云7号卫星上，太阳后向散射紫外光谱仪(SBUV)探测的历年10月份70—80°S纬圈范围内，臭氧总量的平均值以及局地的极小值与极大值，单位仍为DU。其中1970—1972年的资料，是由雨云4号极轨卫星上的后向散射紫外光谱仪(BUV)探测得到的。由表可见，1979年臭氧总量与七十年代初期相近，而1979年以后臭氧总量明显减少，与哈利湾观测结果是一致的。

上述不同年代臭氧总量的明显差异，不

表2 70—80°S纬圈10月份臭氧总量平均值

年	纬圈平均值	局地极小值	局地极大值
1970	306	240	484
1971	334	249	482
1972	337	237	539
1979	333	235	515
1980	270	212	467
1981	266	206	422
1982	283	186	494
1983	245	166	479
1984	240	162	446

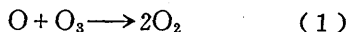
能用季节变化或仪器误差来解释。必须寻找更为有力的证据, 来说明南极地区春季臭氧突然减少, 形成南极臭氧洞的原因。

### 三、对臭氧减少原因的分析

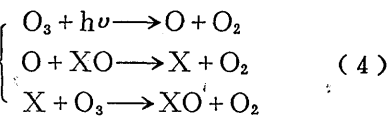
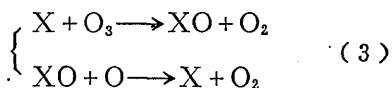
臭氧是大气中的一种自然微量成分, 它在大气中的平均浓度按体积比为百万分之三左右。臭氧的浓度随高度有不同的分布, 而且其含量随季节和纬度而变化。臭氧具有吸收紫外辐射的能力, 对太阳辐射过程有着极其重要的影响, 对生物有害的波长小于 3200 埃的太阳紫外辐射, 绝大部分 (约 99%) 都被高空的臭氧屏蔽掉<sup>[3]</sup>。对于近几年来, 由于南极地区臭氧含量的减少形成臭氧洞的解释, 一些科学家提出了自己的看法。

Farman<sup>[2]</sup>指出, 在观测到臭氧减少的同时, 南极地区的高空温度结构等环流要素以及大气动力过程, 并没有发生明显的变化。因此认为南极臭氧的减少是光化学方面的原因, 而不是动力方面的原因。

高层大气光化学反应中, 臭氧破坏主要是通过以下两种过程完成的:



(1)、(2) 式的反应过程, 大部分是通过微量元素的催化作用间接完成的。



式中  $h\nu$  为照射在臭氧上的辐射光能量,  $X$  是某种起催化作用的微量元素, 可能是一氧化氮 (NO)、氯 (Cl)、氢氧根 (OH)、氢原子 (H) 或溴 (Br) 等。

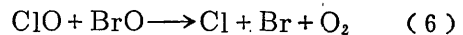
Farman 认为出现臭氧洞这一现象, 起因于南极平流层某些化学元素含量的变化。在 20km 以上高空, 臭氧的变化是强烈相互依存的氯氧化物  $ClO_x$  循环和氮氧化物  $NO_x$  循环季节变化的结果。在南极春季的低温条件下, 氯化物 (主要是 ClO) 含量的增加通过反应:



对  $NO_x$  循环中  $NO_2/NO$  比率有很大的作用。通过光化学计算得出, 南极春季无机氯  $Cl_x$  的增加, 促使臭氧的催化破坏过程加强。南极平流层的上述特点, 加上极地平流层所特有的紫外辐射随高度的分布, 导致了南极春季臭氧的减少。

从光化学反应的角度来解释南极臭氧变化的观点, 是强调了南极平流层由冬季到春季特有的低温环境, 是主要的条件。从这一观点出发较容易地解释了极地臭氧的减少, 只能在南极地区出现, 而不会发生在北极地区。

为了进一步解释从 1975 年以来南极地区臭氧减少的原因, McElroy 等人<sup>[5]</sup>指出, 南极臭氧的减少是由于氯和溴所起的催化作用而引起的。近年来现代工业的高速发展, 使得大气中的 ClO 和 BrO 的含量大大增加, 通过以下反应过程:



使得氯和溴的含量增大, 于是对臭氧的破坏反应过程 (3) 式中, 可由 Cl 或 Br 取代 X。ClO 和 BrO 的增加是近年来发生的, 从而解释了近几年来臭氧总量明显减少的现象。

McElroy 还利用数值实验, 计算了 80°S 光化学反应过程中臭氧含量的垂直分布, 见图 5。图中给出了极夜最后一天, 以及 20、35 和 50 天以后臭氧垂直分布。a) 为只允许气相反应的结果, 其中 50 天以后和 35 天以后的分布情况类似, 故省略; b) 为允许多相反应的结果, 反应速率定为  $1.0 \times 10^{-5} s^{-1}$ ; c) 为允许多相反应的结果, 反应速率定为  $5.0 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。臭氧含量用分压表示, 单位为 nb ( $1nb = 10^{-9} 巴 = 10^{-6} mb = 10^{-6} hPa$ )。在 80°S 极夜后的 20 天、35 天和 50 天, 计算结果与昭和站臭氧探空仪探测结果比较, 多相反应过程中, 10 月中旬臭氧含量减少的量级与实际观测相似。从图 5 可看出, 多相反应引起的臭氧减少的速度比单相反应要快, 也更接近臭氧减少的实际情况。

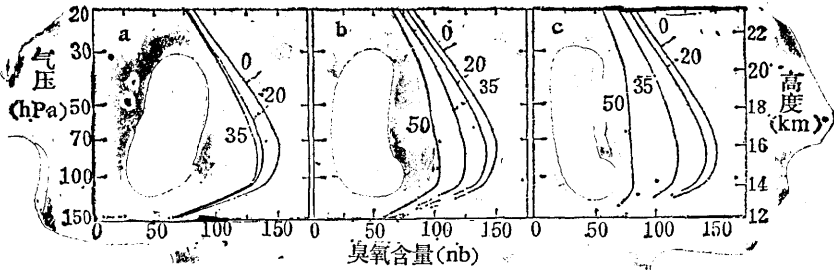
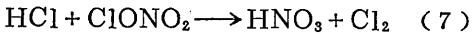


图5 80°S臭氧含量垂直分布的计算结果

Solomon 等人<sup>[6]</sup>给出的臭氧探空仪资料表明, 南极臭氧的变化主要限于每年的8—10月份, 10—20km的高度层内。从单相化学反应的观点出发, 很难解释观测到的臭氧减少的现象。而南极平流层低层频繁出现的极地平流层云, 为多相化学反应提供了有利的场所, 这种环境条件对HCl和ClONO<sub>2</sub>之间的多相反应过程, 尤其有利。因此, 提供了一个解释南极臭氧减少的可能机制。

Solomon 认为, 反应过程(5)在30km的高空可以有效地破坏NO和NO<sub>2</sub>的比例, 从而影响那里的臭氧含量, 但南极春季臭氧主要集中在这一高度以下。目前较为普遍的观点认为, 臭氧的减少是由于大气中氯的增加造成的。在低空ClO或Cl这些起催化作用的微量元素转变成HCl和ClONO<sub>2</sub>, 它们对臭氧作用是惰性的, 在20km处比ClO的含量高约100倍, 使ClO和Cl的浓度大大降低。因此, 如果在平流层低层起催化作用的微量元素的浓度增加, HCl和ClONO<sub>2</sub>必然要大量减少, 这一过程可由如下反应过程完成:



在太阳辐射的照射下, 大气中的Cl<sub>2</sub>很快光化变成Cl。实验室的研究结果表明, 反应过程(7)是多相反应。可以认为只有当平流层气溶胶出现时, 才有利于反应的进行。事实上, 在极地平流层云附近, 气溶胶的表面积大大增加, 在南极冬季和早春10—20km高空的寒冷环境中, 这种平流层云是经常存在的, 出现频率大于相对暖的北极地区。这种平流

层云, 提供了多相反应的条件, 在春季阳光作用下, 可生成大量的催化元素Cl, 促使臭氧的破坏和减少, 这是南极春季臭氧减少的一种解释。

完全否定动力过程对臭氧含量的影响是片面的。Tung 等人<sup>[7]</sup>从大气动力过程的角度对南极臭氧的变化进行了分析, 指出大气中臭氧主要集中在平流层, 因动力或热力原因产生的上升运动, 可以使对流层中臭氧浓度低的空气进入平流层, 从而降低了臭氧的气柱含量。在南半球冬季, 由动力过程引起向极地涡旋的热量输送不强, 南极平流层低层的局地温度有充分适应的时间。因此, 辐射冷却C(T)与非绝热加热H近似平衡, 并且两者达到低值。在辐射达到平衡状态下, 温度为Te, 则:

$$H - C(T_e) = 0 \quad (8)$$

当极夜结束太阳重新出现时, 这种平衡破坏。随着日照时间增加, H迅速增加, 但对温度敏感的辐射冷却仍维持极夜期间的低值。于是因吸收太阳辐射导致的辐射不平衡便产生了正的净加热:

$$Q = H - C \approx \Delta H > 0 \quad (9)$$

Q即可能被局地温度T的增加所平衡, 也可能被加热空气的上升运动所平衡, 或者二者兼而有之, 即:

$$\bar{Q} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \Gamma \bar{w} \quad (10)$$

式中  $\Gamma = \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) + 9.8^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ , 为静力稳定度参数, 横线表示纬向平均,  $\bar{w}$  为除用于升

高局地大气温度以外剩余热量所产生的平均垂直速度。因“动力惯性”的缘故，在初春时净加热将主要导致上升运动，则：

$$\bar{w} = \bar{Q}/T \quad (11)$$

在平流层低层，极地涡旋中心  $\bar{T} < T_e$  出现上升气流，而在极地涡旋的边缘  $\bar{T} > T_e$  出现的是下沉气流。如前面所讨论，上升运动使得极地涡旋中心的臭氧气柱含量减少。

上述的几种观点虽然不能算是对南极臭氧洞形成原因的完美解释，但使我们对其形成的光化学过程和动力过程机制有了初步的认识。从不同作者的分析中可知，臭氧变化的光化学和动力解释，分别强调了臭氧的催化破坏和环流引起的臭氧重新分布的两个不同的机制。实际上，南极臭氧的变化作为一个大尺度现象，一定会有相应的环流机制起较大的作用，而臭氧的变化不会仅仅是个重新分布的问题，在实际观测中，并没有发现在臭氧明显增加的地区，所以臭氧的光化学破坏过程是不容忽视的。因此，分析人类活动或其他自然因素对大气层的影响是十分关键的，而这些影响从北半球以及中低纬度地区到达南极，必然与大尺度环流，特别是平流层环流的特征有着密切的联系。只有从动力过程和光化学过程两个方面综合分析研究，才能根本解决南极臭氧洞形成机制的问题。

#### 四、有关南极臭氧的研究计划

为了进一步研究南极臭氧变化以及引起的后果，1986年3月4—7日，在美国科罗拉多州的Boulder召开了“南极臭氧会议”〔8〕。这次会议由NASA、NOAA和化学制造者协会联合举办。会议除了进行学术交流外，还对有关平流层探测技术和仪器，1986和1987年度准备施行的南极臭氧研究计划以及今后应注意的问题进行了广泛的讨论。

会议认为，为了全面地了解掌握平流层，特别是南极平流层的变化，建立一个地面监测网是很必要的。地面监测的仪器可用地面激光雷达，被动式毫米和分毫米微波辐射仪。此外还可用高分辨红外干涉仪，利用各种元

素对太阳辐射的吸收光谱，测量平流层中各种元素的含量，探测的光谱范围为2—16 $\mu$ m。

会议提出，计划在1986年南半球春季实施的南极臭氧研究项目包括：在美国的麦克默多和阿蒙森-斯科特站施放臭氧探测气球；由美国国家科学基金会赞助，8月份一些科学家到麦克默多站对臭氧、气溶胶及ClO、NO<sub>2</sub>、OCIO等气体进行观测；在新西兰的三个南极站进行NO<sub>2</sub>的观测以及在英国的南极站继续对臭氧总量观测。此外，还提出计划在1987年度实施更深入的探测研究，除地面仪器的观测外，还将开展飞机和气球的探测。

会议从已有的研究工作中，提出以下几点意见供今后工作参考：

1. 在已有的文献中很难找到南极平流层低层气-冰晶相互作用的可靠数据，反应过程的参数，包括反应速度的选择都是经验性的。因此，在实验室中的分析测量与大气中的实际观测，同样都是必不可少的。

2. 虽然对当温度降至192K时，冰晶代替水汽的过程进行过计算。但这种过程对辐射平衡的影响，目前尚不清楚。

3. 用大气环流模式进行动力-辐射的可靠计算，对问题的解决是十分关键的，因为模式可以充分地处理平流层的极涡和低温的条件。另外，我们的注意力不能仅放在南极地区10月份大气臭氧的变化，还要对中低纬度以及其它季节的情况进行综合分析。对模式计算的结果，并不一定比输入物理化学过程的参数精度高。因此，要想做出定性的判断是十分困难的，更不用说定量地解释南极臭氧洞的形成了。

#### 五、结束语

南极臭氧的变化引起了国际科技界的广泛注意，其原因之一是臭氧减少对人类生活环境有很大影响，另外目前对它形成的机制尚不清楚。建立监测网是获取资料开展研究工作的前提，这就要求广泛的国际合作。目前我国有关单位正着手制定计划，研制仪器，计划在1987年在中国南极长城站，开展南极臭氧的观测研究。

## 参考文献

- [1] S. Weisburd, Ozone hole at southern pole, Science News, Vol. 129, No. 9, p133, (1986).
- [2] J. C. Farman, B. G. Gardiner and J. D. Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction, Nature, Vol. 315, P207—210, (1985).
- [3] 廖国南, 大气辐射导论, 周诗健等译, 气象出版社, p55—63, (1985).
- [4] R. S. Stolarski, A. J. Krueger, M. R. Schoeberl, R. D. McPeters, P. A. Newman and J. C. Alpert, Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease, Nature, Vol. 322, p808—811, (1986).
- [5] Michael B. McElroy, Ross J. Salawitch, Steven C. Wofsy and Jennifer A. Logan, Reductions of Antarctic ozone due to synergistic interactions of chlorine and bromine, Nature, Vol. 321, p759—762, (1986).
- [6] Susan Solomon, Rolando R. Garcia, F. Sherwood Rowland and Donald J. Wuebbles, On the depletion of Antarctic ozone, Nature, Vol. 321, p755—758, (1986).
- [7] Ka-Kit Tung, Malcolm K. W. Ko, Jose M. Rodriguez and Nien Dak Sze, Are Antarctic ozone variations a manifestation of dynamics or chemistry Nature, Vol. 322, p811—814, (1986).
- [8] A. F. Tuck, Depletion of Antarctic ozone, Nature, Vol. 321, p729—730, (1986).

## A review on study of antarctic ozone hole

Chen Shanmin Jia Pengqun

(Academy of Meteorology Science)

The total amount of ozone overheaded in late winter and early spring at Antarctica has decreased by about 30—40 per cent during past decade to form an “ozone hole”. Some efforts to interpret the observed fact made by various authors were reviewed to give a comprehensive survey to the problem. The mechanisms raising both in view of photochemistry and in dynamics are as yet in their infancy, but they are the first step of the whole process of understanding the phenomenon. The author of the paper appreciate the idea that the perfect solution of the problem may come from the combination of the two views.