

南极臭氧洞的发现、研究和启示

陆龙骅

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 回顾了南极臭氧洞的发现过程, 评述了南极臭氧洞形成和发展的机制、以及南北极臭氧变化的差异, 讨论了南极臭氧洞的发现和研究所带来的启示。研究指出, 目前只是在南极春季出现了臭氧洞, 北极并没有出现过臭氧洞。在当前大气环境被污染的情况下, 极地大气臭氧亏损的程度将更多地随大气环流, 特别是极地涡旋中的低温状况而发生变化。

关键词: 南极臭氧洞, 消耗臭氧层物质, 极地平流层云, 极地涡旋

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.012

The Antarctic Ozone Hole and its Discovery, Research and Inspiration

Lu Longhua

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: This study reviews the detection and the variety of the Antarctic ozone hole; the reason why the ozone hole is formed over the Antarctic is discussed, while the different patterns of the ozone variation over the Arctic and the Antarctic are outlined. It is also discussed the inspiration obtained throughout the detection and research of Antarctic ozone hole. It is pointed out that, currently, the ozone hole appears only in spring over the Antarctic and not appeared yet over the Arctic. Under the current atmospheric environment with the added pollution, the change of atmospheric ozone depletion over the Polar Regions will be more dependent on the atmospheric circulation, especially the low temperature in the polar vortex.

Keywords: Antarctic ozone hole, ozone depleting substances (ODS), polar stratospheric cloud, polar vortex

0 引言

全球大气平流层臭氧减少、南极春季出现臭氧洞, 与全球二氧化碳增加、近百年全球变暖一样, 是人们广泛关注的热点问题。因为臭氧层是地球生命的保护伞, 它的变化对地球生态系统和大气环境有重要影响。

大气臭氧是一种重要的痕量气体, 它主要分布在平流层, 通常最大浓度出现在离地20~25km的地方。臭氧层大量吸收来自太阳的紫外辐射, 其中对生物特别有害的UV-B辐射大部分(95%)被吸收。全球臭氧层变薄将使到达地面的紫外线增强, 通过光化学反应产生的烟雾会恶化近地面空气质量, 从而影响生态系统, 并对人类健康有潜在或直接的影响。此外, 臭氧本身也是一种温室气体, 其浓度及在大气中的分布也会对地球大气温室效应有所贡献。近50年来, 人们

对全球臭氧总量减少十分关注。特别是自20世纪80年代中期发现南极臭氧洞以来, 各国政府和科学家都加强了对南极大气臭氧变化的监测和研究。南极“臭氧洞”的出现使得大气臭氧层的保护真正进入了公众的视野。1987年, 各国政府签订了旨在保护大气臭氧层的限制和最终禁止排放损耗大气臭氧的氟氯烃类化合物(以氟利昂和哈龙为代表)的蒙特利尔协议。值得欣慰的是, 《蒙特利尔议定书》的严格执行, 扼制了氟里昂等污染物的浓度在大气中的增长, 而且目前已出现了缓慢下降趋势, 南极臭氧也有望在2070年前后恢复到1980年的水平。

为了加强人们对臭氧层保护的认识, 世界气象组织(WMO)秘书处自1991年起, 在每年8—12月的南极臭氧洞期间, 都通过全球电信系统(GTS)发布南极臭氧公报。从1995年起, 各期南极臭氧公报都可以在互联网上获得, 其中, 也包括了我我国南极中山站的大气臭氧观测资料。

本文回顾了南极臭氧洞的发现及变化, 评述了南极臭氧洞发生和变化的原因以及南北极臭氧变化的差异, 讨论了南极臭氧洞的发现和研究所带来的启示。

收稿日期: 2016年2月1日; 修回日期: 2016年3月7日
作者: 陆龙骅(1942—), Email: lulonghua@cma.cn
资助信息: 南北极环境综合考察和评估专项(CHINARE-2016);
国家自然科学基金项目(41076132)

1 春季南极“臭氧洞”的发现和变化

目前,科技界大多认为是英国科学家最早发现了南极臭氧洞^[1]。

1985年,英国科学家Farman等^[2]利用1957—1984年南极Halley站的资料(图1),在Nature杂志上报道了该站观测到的自1970年以来伴随南半球平流层大气氟氯化物浓度的增加,南极春季大气臭氧总量出现急剧减少的现象,并明确指出这一现象与当时数值模式模拟30°N大气臭氧的长期变化趋势是不一样的。Farman等^[2]认为,在春季平流层低温条件下,人类活动排放的污染物质(ClO_x 和 NO_x)在紫外辐射作用下的化学反应,能解释南极大陆上空臭氧总量的巨大损耗。文章发表后在科技界引起了巨大的反响,也有很多科学家对此提出了质疑^[3-4]。质疑主要来自两个方面。首先,当时的大气科学界大都认为,极地是大气化学反应的惰性区域,主要由日光驱动的平流层化学模式并没有指出在南极会出现臭氧层异常^[1];其次,

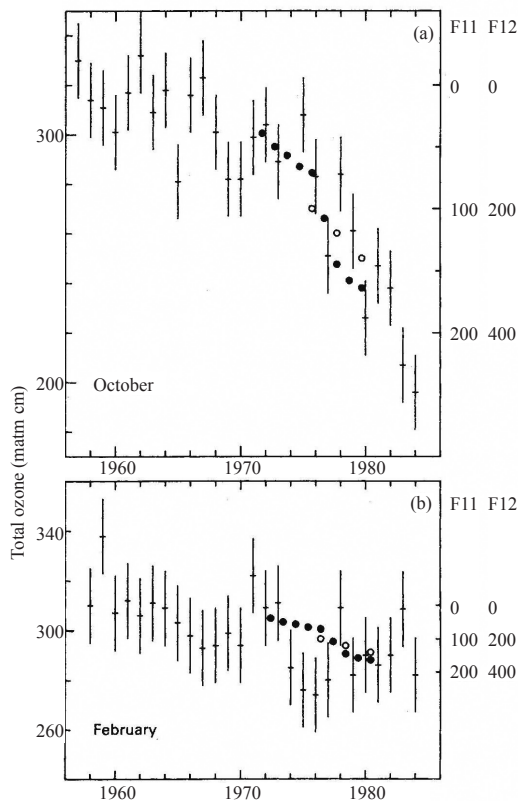


图1 南极Halley站大气臭氧总量和南半球F11 (CFCl_3)、F12 (CF_2Cl_2)月平均值的变化:(a) 1957—1984年10月,(b) 1958—1984年2月。(注:F11和F12均为人造污染物质,图中F11和F12的纵坐标均为向下为增加)^[2]

Fig. 1 Monthly means of total O_3 at Halley Bay, and Southern Hemisphere measurements of F11 and F12: (a) October, 1957—1984; (b) February, 1958—1984 (F11 and F12 belong to man-made pollutant. F11 and F12 amounts increase down the figure)^[2]

人类已进入卫星大气探测时代,NASA的卫星早就开始了全球大气臭氧探测,为什么不是NASA的科学家,而是地基单站观测发现如此重要的南极春季大气臭氧总量急剧减少现象?

实际上,最早报道春季南极地区大气臭氧总量减少的是日本科学家Chubachi^[5-6]。1984年,他利用1982年2月—1983年1月的日本南极昭和站的大气臭氧观测资料(图2),报道了1982年春季(9—10月)昭和站上空大气臭氧总量异常减少,以及与平流层下部温度增加有关的在10月底大气臭氧总量又突然增加的现象,指出自1966年起,每年9—10月在昭和站都观测到了大气臭氧总量的低值。这一现象在美国南极极点站(Amundsen-Scott)也存在。

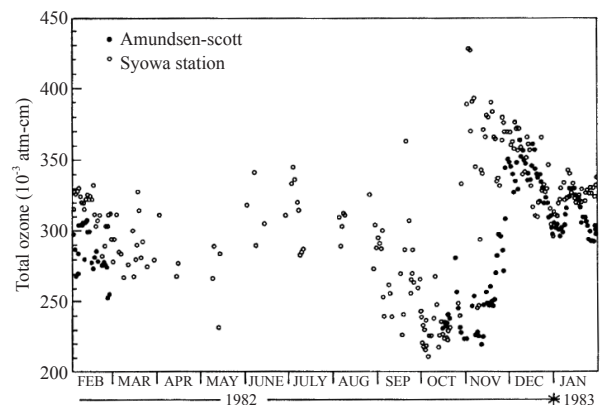


图2 1982年2月—1983年1月南极昭和站、极点站的大气臭氧变化^[5]

Fig. 2 Comparison of total ozone at Amundsen-Scott with that at Syowa Station observed in February 1982 till January 1983^[5]

在日本和英国科学家开展了研究后,1986年美国NASA的科学家Stolarski等^[7]用雨云-7气象卫星的大气后向紫外散射/臭氧总量测绘系统(SBUV/TOMS)资料证实了上述结果。卫星探测结果表明,春季大气臭氧总量的损耗出现在整个南极地区,在南极大陆上空,出现了大气臭氧总量的低值中心。这种减少发生在南极极夜结束后太阳光再次照射南极的9月,10月中旬出现臭氧总量的最低值。1979—1985年,10月的臭氧最小值较早先同期减少了40%(图3)。

在春季,南极地区臭氧总量急剧减少,会出现低于全球平均值30%~40%的闭合低值区(通常这个值设定为220 DU),与周围地区相比,就显得南极大陆上空出现一个臭氧低值的“空洞”,这就是南极臭氧洞(图4)。

南极臭氧洞的发现充满了喜剧性。Chubachi最早报道的春季南极地区大气臭氧异常减少现象,正是由于南极臭氧洞引起的。只是他当时把注意力放在臭

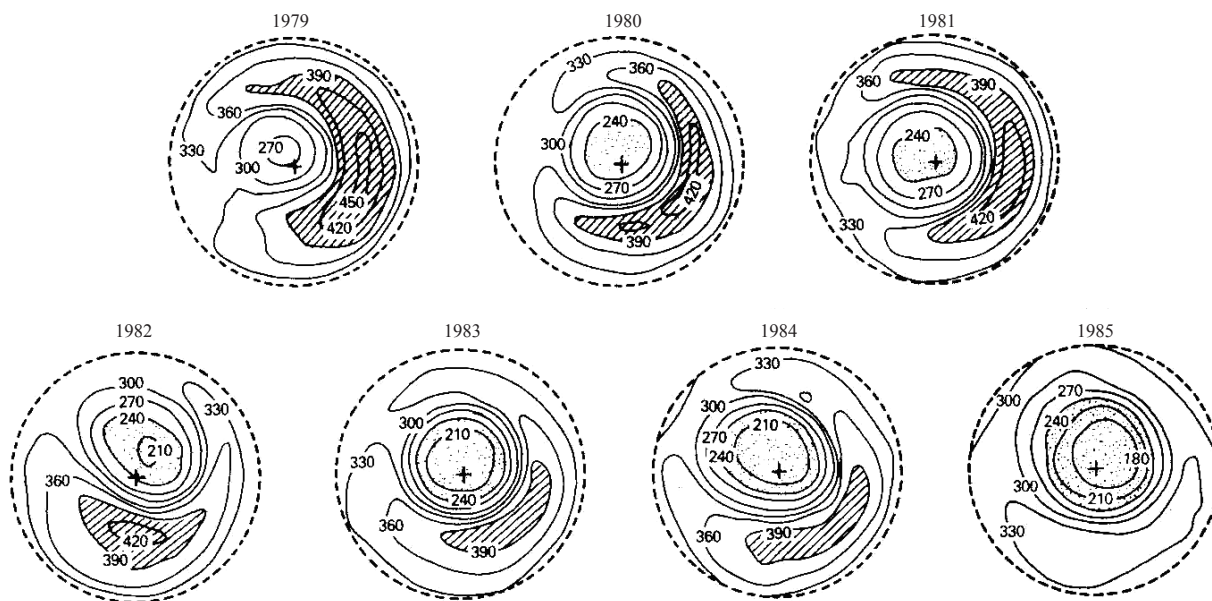


图3 1979—1985年10月南极地区大气臭氧总量的月平均分布 (阴影为臭氧月平均总量>390 DU的区域) [7]

Fig. 3 October monthly means of total ozone over Antarctica from 1979 to 1985 (the shaded regions indicate monthly mean total ozone amounts of >390 DU)

氧总量出现低值后的突然增加，并正确指出了这种增加与平流层增温有关；但可惜的是他并未敏感地抓住大气臭氧异常减少现象，并讨论其可能原因。加之Chubachi最早是在日本国内发表论文，虽当年在希腊臭氧国际会议上也作了报告^[6]，但其国际影响力远远比不上Farman等在*Nature*上发表的论文。而且，Farman的论文，不但揭示了南极春季大气臭氧总量急剧减少现象，还正确指出了这一现象的可能原因。从学术上来说，其影响也要比Chubachi大。

Farman与美国NASA科学家关于南极臭氧洞的发现也有一番争论。据说NASA负责卫星资料处理的人曾承认，他们于Farman发表文章的前一年，就在希腊臭氧国际会议上听说日本人发现了南极春季臭氧减少^[4]，此后才考虑了被卫星软件自动忽略的“异常数据”，证实了春季南极臭氧洞的存在。因此，虽然现在大多认为是Farman首先发现了南极臭氧空洞，实际上Chubachi应该是发现春季南极地区大气臭氧异常减少，即南极臭氧洞的第1人（图5）。

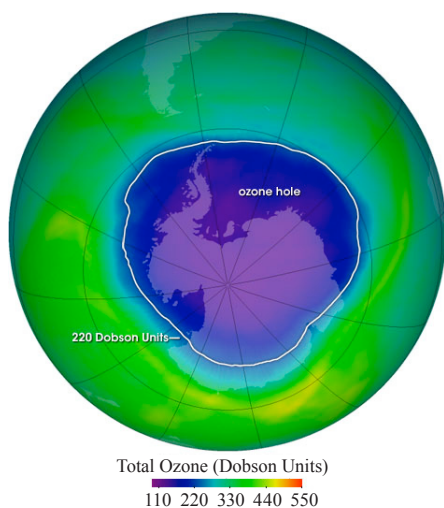


图4 南极臭氧洞 (来源: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/hole_SH.html)

Fig. 4 The ozone hole over Antarctica



图5 日本科学家忠钵繁 (Chubachi)

Fig. 5 Japanese scientist Chubachi

在现代,重大的科学发现都不可能是个人行为,就拿南极臭氧洞的发现和确认来说,虽Chubachi和Farman等最早报道了南极春季臭氧洞引起的臭氧异常减少现象,但由于用的是单站地面观测资料,不能说明其影响的空间范围,在他们发表的文章中也未出现臭氧洞(ozone hole)一词;Stolarski等在得知Chubachi和Farman等的发现后,修正了卫星臭氧探测的资料处理程序,不但证实了他们的发现,还指出春季大气臭氧总量的损耗出现在整个南极地区,在南极春季出现了大范围的臭氧低值区域,给出了南极臭氧

减少的总体图像。只是在NASA科学家确认南极春季大气臭氧总量急剧减少现象后,南极臭氧洞一词才成了公众的语言。因此,他们3人及其所在的团队,都为南极臭氧洞的发现和确认做出了贡献。

南极臭氧洞并不是全年都存在的,而只是在南极春季出现。通常南极臭氧在7月下旬开始减少,8月中旬后就出现较为明显的臭氧洞,9月下旬到10月上旬臭氧洞的面积最大,10月底后臭氧急剧增加,臭氧洞逐渐填塞,12月中旬恢复正常(图6)。

南极臭氧洞的强度和范围各年是不同的,“空

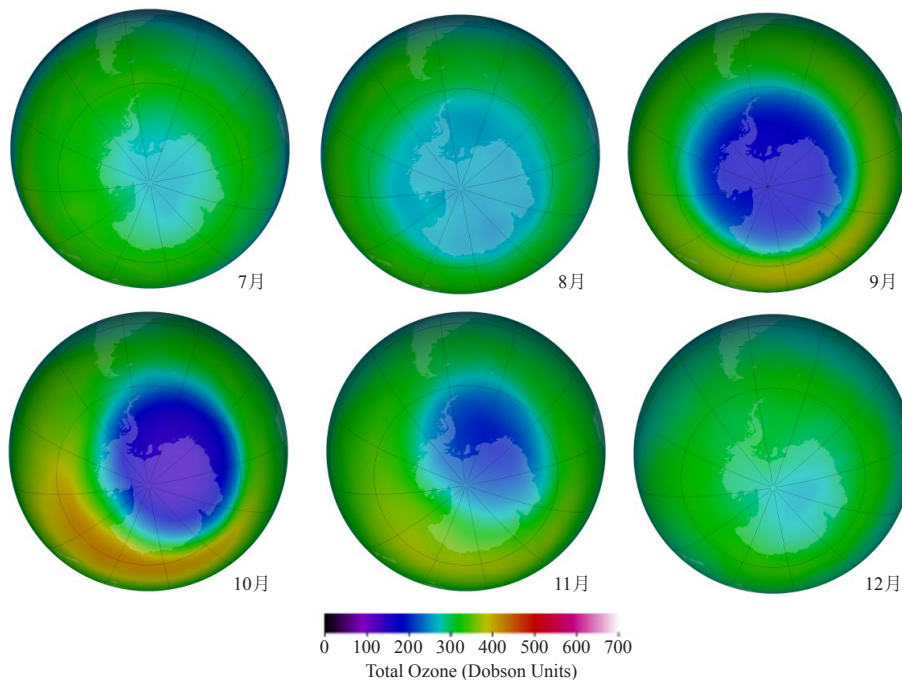


图6 南半球7—12月臭氧平均分布(1979—2014年)

Fig. 6 Average monthly maps of total ozone over the Southern Hemisphere for June–December from 1979 to 2014

洞”中的最低值也呈波动状。1979年春季,南极地区刚出现臭氧洞时,范围并不大,随后臭氧洞的范围逐年扩大;1988年后则稍有缓和;1990年以后,南极“臭氧洞”现象再次加剧,维持时间也加长(图7)。

2000年和2006年南极臭氧洞最大时面积超过2900万 km^2 ,其中心地区的臭氧总量与正常值相比耗损70%左右;而在南极臭氧洞最小的2002年12月,臭氧洞面积不到300万 km^2 ,只有近10年来平均值的1/7(图8)。

我国的南极中山站位于东南极大陆边缘($69^{\circ}22'S$, $76^{\circ}22'E$),经常处于极地涡旋和春季南极臭氧洞的边缘,对南极臭氧洞的变化十分敏感。1993年,我国在中山站使用国际认可的Brewer臭氧分光光谱仪,开始了对大气臭氧总量的地基观测。图9给出了南极中山站1978—2014年大气臭氧总量月平均

值的变化,其中1993年以前的资料,是据中山站上空NASA卫星臭氧观测结果拟合外延的。由图4可以看出,春季(9—10月)我国南极中山站处于南极臭氧洞的下方,臭氧总量的月平均值也经常低于220 DU;1995年前,中山站的大气臭氧总量有总体减少的趋势,而1995年后,则转为缓慢增加的趋势。南极中山站的大气臭氧变化,与南极地区大气臭氧及南极臭氧洞的变化是一致的。

在南极臭氧洞维持期间,也并不是南半球所有地方臭氧都同样地减少,臭氧低值中心常常偏向于西南极的南极半岛一侧,且自1992年以来,南极臭氧洞都曾一度短暂地伸展到有人类居住的南美洲南端。其中,阿根廷乌斯怀亚($54^{\circ}48'S$, $68^{\circ}19'W$)多次观测到了低于150DU的极端低值。由于臭氧亏损使到达地

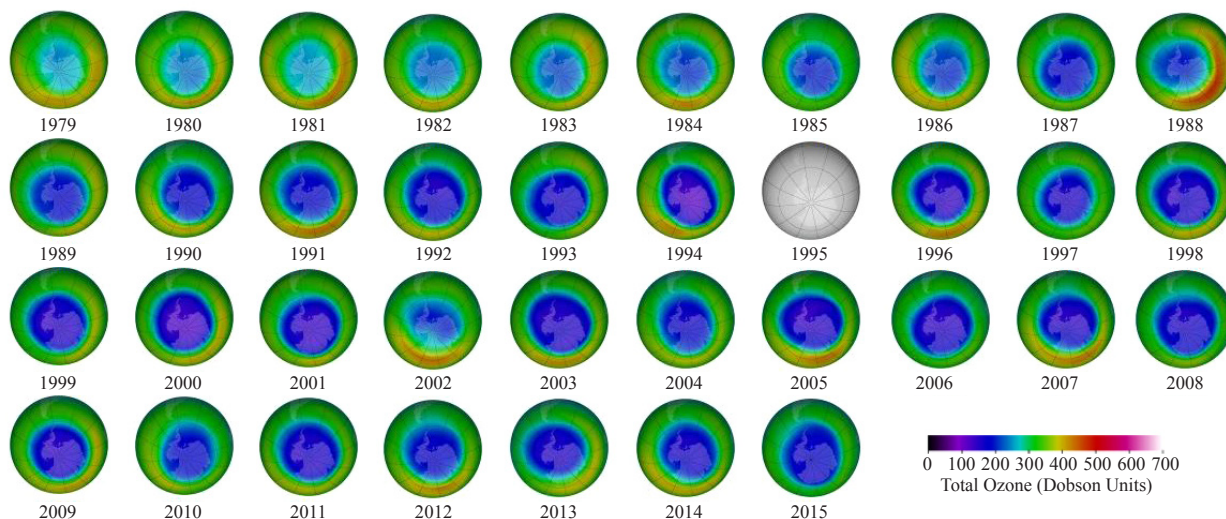


图7 1979—2015年历年9月南极臭氧月平均值分布

Fig. 7 Monthly maps of total ozone over Antarctica for September from 1979 to 2015

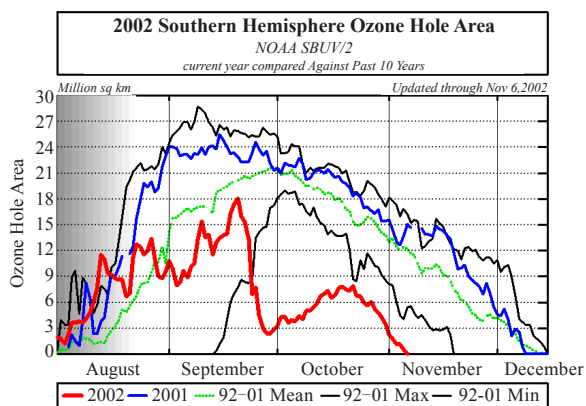


图8 2002年的南极臭氧洞异常

Fig. 8 The anomalous 2002 Antarctic ozone hole

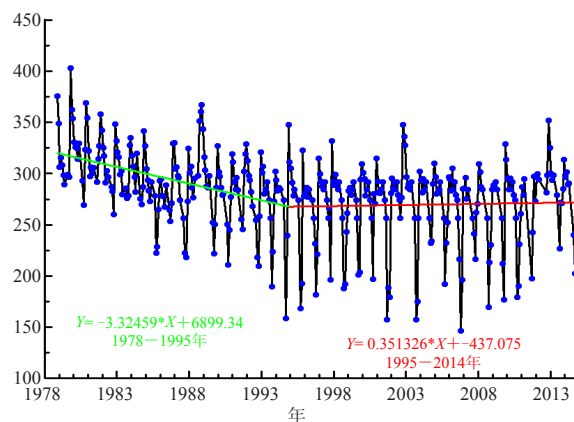
图9 南极中山站大气臭氧总量月平均值的变化
(1978—2014年)

Fig. 9 Average monthly changes of total ozone over the Antarctic Zhongshan Station for 1978—2014

面的紫外辐射强度剧增,这会带来至今未知的严峻生态后果。

在南极臭氧洞期间,南半球中纬度地区,尤其是澳大利亚—新西兰一侧,经常维持总量为350~450DU的臭氧高值区^[8]。

2 南极臭氧洞形成机制的证实

南极臭氧洞的发现,大大激发了各国科学家研究南极“臭氧洞”的兴趣,对南极臭氧洞的形成机理也提出了各种解释,其中主要有大气动力学、太阳活动和大气化学过程三种解释。

1) 大气动力学解释

南极的冬季是极夜,收不到太阳辐射,南半球的行星波活动较弱,使南极平流层的大气与周围地区的

动量、热量和质量交换很少,处于相对稳定的状态,而大气本身却以长波辐射的形式不断往外放出热量,在南极平流层形成环极涡旋(极地涡旋)。环极涡旋的范围和形状同南极臭氧洞相似,并且环极涡旋的平衡状态在每年的春季被破坏,这与南极臭氧洞的出现和闭合好似有某种联系。大量观测事实也表明:近年来南极平流层春季温度与臭氧总量的迅速下降存在着线性关系。南极平流层温度每下降1℃,臭氧总量就会下降3%。因此有人认为,南极臭氧洞是由大气动力学过程造成的自然现象^[9]。

2) 太阳活动解释

有人发现,太阳黑子数与臭氧总量的变化存在显著相关,并且臭氧总量的3年滑动平均值与太阳活动

一样也有11年的周期^[9]。南极地区是臭氧对太阳活动响应最敏感的地区，除了太阳紫外线辐射大大增强对臭氧的影响外，逐渐增多的大量的带电粒子也会对南极臭氧洞的形成发生影响。也有人认为随着太阳活动峰年时，宇宙射线明显增强，使大气中的NO₂和其他奇电子氮化合物的含量增加，会通过光化学过程破坏南极的臭氧层^[9]。

3) 大气化学过程解释

早在20世纪30年代，Chapman^[10]就提出光化学反应是大气中臭氧生成和破坏的主要因素。20世纪70年代，美国政治界、企业界和科学界，还围绕着氟里昂（CFCs）等人造化学物质能否导致地球大气臭氧层减薄，展开过一场臭氧战。1970年，Crutzen^[11]发表了大气中的NO_x参与了损耗臭氧的催化反应的研究结果，随后来自超音速飞机尾气排放的氮氧化物对平流层臭氧损耗也被关注；1974年，Molina等^[12]发表了平流层是CFCs汇的文章，指出CFCs最终对平流层臭氧的危害远高于NO_x，同年也有人发表了相似的研究成果^[13]。这些研究对平流层臭氧的损耗化学理论奠定了重要的基础。持这种观点的人认为，正是人类活动排放到大气中的大量的含氯化合物（主要是氟里昂类物质）参与的光化学反应破坏了南极大气臭氧层。但到20世纪80年代初，对这些工作的重视程度不够，特别是1984年有人发表了用一维模式模拟30°N的大气臭氧层受CFCs损耗的模拟结果^[14]，错误地认为大气臭氧层受CFCs的损耗情况不是很严重，不足以引起臭氧层的长期变化。

上述三种原因尽管都能在一定范围内和一定程度上解释南极臭氧洞的形成，但它们各有片面性。大气动力学及太阳活动原因都不能解释为什么臭氧洞只在20世纪70年代末才出现；也不能解释已经发现的全球性的大气臭氧总量下降，以及南极平流层冬、春季低温与臭氧总量减少的因果关系。单纯的大气化学原因能解释以上两个问题，却无法说明臭氧洞只出现在南极的春季，也无法解释近年来南极臭氧洞的异常变化^[9]。

为进一步确认南极臭氧洞的成因，各国科学家通过气球、飞机、火箭、卫星及地面站等多种观测方法获取了大量资料，并用计算机进行了分析和模拟研究。其中，美国科学家1986年后进行了多次综合科学试验，通过南北极现场观察和实验室工作相结合的方法，为解决这一难题提供了第一手证据^[1]。美国南极McMurdo站的地基微波测量和ER-2飞机探测，都在南极平流层下部20km处实地观测到了ClO的高值

区。ER-2飞机观察，不但测得了在南极圈有极端高的ClO，也观测到了与极地平流层云（polar stratospheric clouds, PSCs）有关的真实的脱氮和脱水（图10）。这两个独立的方法证明，人类释放的碳氟化合物是导致臭氧损耗的首要因素。这种增强的臭氧损耗，发生在寒冷温度时极地平流层的云的表面，与异种氯化学有关^[1]。

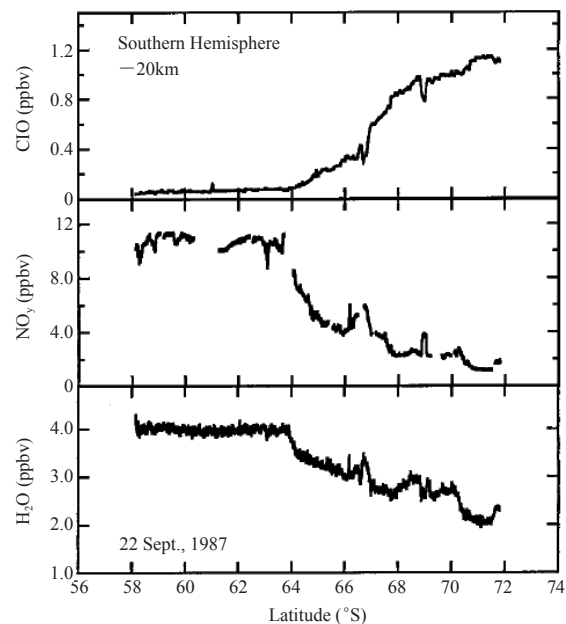


图10 1987年9月ER-2飞机观测的高度约20km处的ClO、NO_y和H₂O的纬向分布^[1]

Fig. 10 Observations of the latitude gradients in ClO, NO_y, and H₂O near 20km altitude on a flight of the ER-2 aircraft in September 1987^[1]

曾有两届诺贝尔化学奖得主的工作，与研究臭氧洞形成的原因有关^[15]。1995年，诺贝尔化学奖颁发给了三名大气化学家：Crutzen（图11）、Molina和Rowland，以表彰他们在平流层臭氧研究领域所做贡献；南极“臭氧洞”的发现及臭氧洞形成机制的确



图11 2008年6月臭氧会议上，Crutzen与作者合影
Fig. 11 Paul Crutzen and Lu Longhua at a meeting with regard to ozone research in June 2008

认, 是他们三位获得诺贝尔化学奖的重要基础。Ertl因在固体表面的化学过程研究中的贡献独得了2007年诺贝尔化学奖, 而表面化学过程也是导致臭氧层被破坏的重要过程。

南极臭氧洞是大气动力学、大气化学和平流层冰晶云等三个因素相互作用和影响的产物。大气环流, 特别是平流层极地涡旋的活动是臭氧洞形成的不可缺少的外部因素^[15]。

南极臭氧洞的出现与人类活动关系密切。为制造冰箱和空调器等, 人类发明和使用氟里昂、溴化烃等含氯和溴的化合物, 正是这类污染物质导致了臭氧层的破坏, 在南极地区的实地观测也找到了氯氟烃等物质消耗臭氧层的确凿证据^[1]。这类污染物质的化学性质十分稳定, 在大气中滞留的时间很长; 在大气垂直环流作用下会对流层到达平流层, 并通过大气环流的远距离输送和极涡的动力学效应在极地平流层中聚合起来。人类活动排放到大气中的氟里昂、溴化烃等含氯和溴的消耗臭氧层物质, 在极地平流层低温条件下形成的冰晶云或液态硫酸气溶胶表面, 会通过非均相化学反应和光化学反应大量消耗臭氧, 而非均相化学反应提供活动界面的平流层冰晶云或液态硫酸气溶胶, 只有在温度低于 -78°C 时才出现。

因此, 形成臭氧洞需要满足两个条件: 大气中存在有人类活动排放的氟里昂、溴化烃等消耗臭氧层物质(人为因素), 是春季南极臭氧洞形成的一个必要条件; 而春季南极平流层极地涡旋中较长时间的低温(自然因素), 则是南极春季臭氧洞形成的又一必要条件。只有同时满足这两个条件, 在平流层极地涡旋中低温(温度低于 -78°C)条件下形成的冰晶云或液态硫酸气溶胶表面, 吸附了大气污染物质, 才能在太阳光照耀下, 激发氯和溴的活性, 通过非均相化学反应和光化学反应大量消耗臭氧, 在南极春季形成臭氧洞。也就是, 只有这两个条件结合起来, 才是形成臭氧洞的充分必要条件^[15]。

由南北极地区($60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{N}$) 50hPa纬向平均温度变化(图略), 可知在南极地区春季, 极夜结束、阳光再次照耀时, 平流层下部仍可维持一段时间低温, 其中, 臭氧洞面积最大的2006年, 温度最低, 低温时间也最长; 而在春季臭氧洞异常偏小(最小时只有同期平均面积的1/7)的2002年, 温度偏高, 低温持续时间也最短。也正是由于平流层温度、极地涡旋强度和位置的变化, 造成了2002年南极和历年南极臭氧洞强度和范围的变化。北极冬季平流层50hPa的温度通常都要比南极地区高。虽然北极冬

季平流层极地涡旋中的温度也能低于 -78°C , 但在极夜过后的春季, 北极平流层极地涡旋中的温度大多在 -78°C 以上, 在春季北极平流层中, 很难满足形成冰晶云的低温条件。1979年以来, 北极极涡强、温度特低的年份, 只有2011年和1997年, 在极夜过后的春季, 平流层极涡还短暂(10~15天)保持低于 -78°C 的低温, 虽此时北极平流层中大气臭氧的化学亏损的数值也很大, 但由于当地春季大气臭氧值总量通常为400DU以上, 本底值要比南极地区高100DU, 加之低温持续时间短, 因此仍很难达到臭氧洞(220DU)的标准, 迄今为止, 在北极还并未出现过臭氧洞。

因此, 在当前大气环境被污染的情况下, 极地大气臭氧亏损的程度更多地将随大气环流, 特别是极地涡旋中的低温状况而发生变化。极夜结束后极涡中的低温是极区臭氧洞形成的关键因素。

3 结语

南极臭氧洞的发现和研究, 是20世纪大气科学领域最重要的创新成果之一, 保护臭氧层是迄今人类最为成功的全球性合作典范^[16-17]。南极臭氧洞的发现和研究也给了人们很多启示:

1) 坚持长期基础性的观测十分重要

对南极臭氧层的观测是从1957年国际地球物理年开始的, 在那种特殊的环境下, 气象科研人员在默默无闻地坚持了近30年后才获取了南极“臭氧洞”的重大发现, 这也是当初决定在南极站布置观测的科学家们所没有预见到的。南极早期的Dobson臭氧总量的观测, 必须人工在室外一天数次地测, 如果没有认真的坚守, 这样的发现是很难获取的。

2) 要采用创新思维, 认真分析第一手资料

南极臭氧洞的发现者Chubachi和Farman, 都是利用在第一线获得的资料, 通过对资料的科学严谨分析, 揭露了大气科学的新事实, 促进了大气科学的发展。按说NASA是掌握卫星探测全球臭氧资料最早和最多的机构, 但遗憾的是, 他们的资料处理程序把反映南极臭氧洞的资料, 当作异常资料删去了, 与臭氧洞的发现失之交臂; 无独有偶的是, 20世纪当中国科学家等发现夏季在青藏高原上空, 出现以动力原因为主产生臭氧相对低值中心(臭氧低谷)^[18-19]时, NASA再次缺位, 只是与发现南极春季臭氧季节性减少一样, 事后证实夏季青藏高原臭氧低中心确实存在。

此外, 尽管面对的是同一现象, 但是Chubachi和Farman思考分析的角度和深度是不一样的。Chubachi是基于气象观测数据进行思考的, 基本上只是就事论事; 而Farman等的分析角度, 则是进一步从 ClO_x/NO_x

的角度探讨了导致这一现象的可能原因。Farman和他的观测小组之所以能做到这一点，是因为他们始终跟踪当时臭氧科学的最前沿，对人类活动臭氧损耗可能影响的研究有所了解。

3) 正确认识观测资料分析和数值模拟的作用

在南极臭氧洞被发现的20世纪80年代，对平流层臭氧的数值模式预测，至少在未来10年内大气臭氧总量不会有太大的变化^[13]。南极臭氧洞的发现，证明该模式不能反映在极地平流层中低温条件下发生的大气臭氧的光化学损耗。随着计算机技术及大气科学理论和探测技术的发展，数值模拟也有了飞跃的发展。南极臭氧洞发现后，模式进行了修改，现在使用平流层观察风和温度，以及已知化学过程的最新颖的化学传输模式（CTMs），已经可以成功地模拟观察到的南北极大气臭氧浓度变化^[16]。但我们仍然应清醒地认识到，由于知识水平的限制，要依靠数值模式来发现诸如南极臭氧洞一类的创新成果仍是十分困难的；数值模式的发展，要依靠与现场观测结果的比较来提供线索。反之，模式也是对观测数据验证的最重要而有效的工具，南极“臭氧洞”机制的最终确定也离不开数值模式的验证工作。

南北极是目前全球气象资料最贫乏的地区之一，气象台站的密度远小于人类居住的其他地区。在卫星遥感技术飞速发展的现代，虽利用高分辨率的卫星遥感资料获得了大气温度、湿度及臭氧总量，并由此来填补南北极地区的资料不足，但必须用各种实测资料来进行对比和校正。目前，南北极地区的实地大气科学观测仍是不可取代的。

致谢：承蒙周秀骥院士、郑向东研究员阅读了本文初稿，并提出宝贵意见，在此一并致谢。

参考文献

- [1] Solomon S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. *Reviews of Geophysics*, 1999, 37(3): 275-316.
- [2] Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 1985, 315: 207-210.
- [3] 贾朋群. 他曾让NASA和卫星探测陷入尴尬一记发现南极臭氧洞的英国科学家法曼. *气象科技进展*, 2014, 4(6): 106-110.
- [4] 罗丹. 臭氧空洞的发现与错过. *新知客*, 2008, 12: 96-100.
- [5] Chubachi S. Preliminary result of ozone observations at Syowa station from February 1982 to January 1983. *Mem Nati Inst Polar Res*, 1984, 34: 13-19.
- [6] Chubach S. A special ozone observation at Syowa Station, Antarctica from February 1982 to January 1983. In *Atmospheric Ozone, Proceedings of the Quadrennial Ozone symposium*, Halkidiki, Greece, September 3-7, 1984.
- [7] Stolarski R S, Krueger A J. Nimbus-7 satellite measurements of the spring time Antarctic ozone decrease. *Nature*, 1986, 332: 808-811.
- [8] 陆龙骅. 春季南极臭氧洞与环境保护. *科学*, 2008, 60(2): 15-18.
- [9] 张永萍, 陆龙骅. 南极臭氧洞研究综述. *南极研究*, 1990, 2(2): 67-80.
- [10] Chapman S. A theory of upper atmospheric ozone. *Mem Roy Meteorol Soc*, 1930, 3: 103.
- [11] Crutzen P J. The influence of nitrogen oxide on the atmosphere content. *Q J R Meteorol Soc*, 1970, 96: 320-327.
- [12] Molina M J, Rowland F S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 1974, 249: 820-821.
- [13] Stolarski R S, Cicerone R J. Stratospheric Chlorine: a possible sink for ozone. *Can J Chem*, 1974, 52: 1610-1615.
- [14] Prather M J, McElroy M B, Wofsy S C. Reductions in ozone at high concentrations of stratospheric halogens. *Nature*, 1984, 312(5): 227-231.
- [15] 陆龙骅. 臭氧与臭氧洞. *自然杂志*, 2012, 34(1): 24-28.
- [16] World Meteorological Organization (WMO). Scientific assessment of ozone depletion, 2014: World Meteorological Organization, Global ozone research and monitoring project – Report No. 55, Geneva, Switzerland, 2014.
- [17] 卞林根, 林忠, 郑向东, 等. 南极臭氧洞的影响因子和变化趋势. *气候变化研究进展*, 2011, 7(2): 90-96.
- [18] Reiter E, Gao D Y. Heating of the Tibet Plateau and movements of the South Asian high during spring. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 1694-1711.
- [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. *科学通报*, 1995, 4(15): 1396-1398.