南极臭氧洞的发现

胡永云

北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871

E-mail: yyhu@pku.edu.cn

1 臭氧洞的发现

1985 年 5 月, 英国南极调查局的三位大气科学家 Farman 等人^[1]在《自然》(Nature)杂志发表论文, 首次根据南极观测, 揭示了南极平流层臭氧自 20 世纪 70 年代末开始, 每年春季就出现急剧降低的现象, 而且臭氧降低的趋势在不断加强. 他们还提出人类排放的氟利昂是导致南极平流层臭氧急剧损耗的重要原因, 认为南极平流层在春季极低的温度为臭氧损耗化学反应的发生提供了环境条件. Farman 等人^[1]提出的臭氧损耗化学反应机制并不正确, 但他们所揭示的观测事实则首次证实了臭氧洞的存在^[2], 我们在下面将详细解释. 臭氧洞的成因很快成为大气化学领域的热点研究方向, 多个团队开展了大量的飞机、探空和卫星观测. 基于这些观测结果, 正确的化学反应机制被提出, 那就是低温下的异相化学反应是导致南极每年春季平流层臭氧急剧降低的主要原因, 而不是低温本身. 这些研究明确指出, 人类排放的氟利昂是导致臭氧洞形成的根本原因.

图 1 所示的是 2000 年 9 月 10 日的臭氧洞空间分布. 臭氧洞面积达 2990 万平方千米, 是历史上日平均面积最大的臭氧洞. 臭氧洞不仅完全覆盖了南极大陆, 还延伸到了南美大陆. 臭氧洞的定义以 220 DU 等值线来界定, 臭氧柱含量低于该阈值的区域为臭氧洞. 之所以 220 DU 等值线被选定为阈值来定义臭氧洞的范围, 是因为在 1979 年之前, 从没有发现臭氧柱含量低于该阈值. 臭氧柱含量的单位是 Dobson Unit(DU), 该单位是指指在 0°C 和一个标准大气压(1013.25 hPa)的条件下, 把一个空气柱中的全部臭氧压缩到地表时, 臭氧柱所具备的厚度, 大约是几个毫米. 例如, 全球平均臭氧柱含量大约是 3 mm, 为方便使用, 通常把臭氧柱含量乘以 100, 也就是 300 DU. 图 2(a)所示的是 1979 年以来臭氧洞面积的逐年变化. 可以看出, 臭氧洞面积在 1979~2000 年呈逐年扩大的趋势, 之后臭氧洞面积逐渐缩小. 在 1988、2002 和 2019 年, 臭氧洞面积特别偏小^[3]. 这是因为南极平流层涡旋突然崩溃, 南极涡旋外围的高浓度臭氧进入南极, 导致臭氧洞面积突然缩小. 图 2(b)展示的是南极臭氧洞内部最低臭氧柱含量的逐年变化, 最低臭氧柱含量自 1979 年的 235 DU 降低至 2000 年的 105 DU, 之后开始缓慢回升. 与图 2(a)相对应, 最低臭氧柱含

胡永云 北京大学教授. 2000 年获芝加哥大学博士学位, 2000~2004 年分别在华盛顿大学和哥伦比亚大学做博士后, 2004 年任教北京大学至今, 曾任北京大学物理学院副院长和大气与海洋科学系系主任. 研究方向为现代气候、古气候、行星气候和宜居性.

量有 3 个高值年, 分别是 1988、2002 和 2019 年.

2 臭氧层

关于臭氧气体的发现, 最早可追溯到 19 世纪 30 年代. 1839 年 3 月 13 日, 巴塞尔大学的 Schönbein 教授在一次学术报告中首次报道了他在实验室发现了一种有臭味的气体^[4]. Schönbein 甚至试图用化学的方法测量大气中臭氧的含量, 因为当时人们已经知道, 闪电之后大气中通常有臭味, 很类似臭氧的味道. 当然, 他使用化学方法的测量并不太成功, 因为大气中的臭氧主要并不在近地面, 而是位于 25 km 的高空.

1881 年, 爱尔兰物理学家 Hartley^[5]在测量地表太阳紫外辐射时, 发现太阳辐射光谱在 0.3 μm 波段处存在突然截断的现象, 这表明太阳紫外辐射在穿越大气层时被某些气体吸收了. Hartley 将其归因于臭氧分子的吸收, 也就是说大气中存在足够多的臭氧, 吸收了绝大部分的太阳紫外辐射. 但这并没有解决臭氧的垂直分布问题, 直到 20 世纪 30 年代, 气球探空开始实施, 发现臭氧层主要位于 15~30 km 的高空, 最大臭氧浓度大约在 25 km. 对臭氧层观测历史最悠久的柏林探空站, 就是在那个时间开始的.

1930 年, 英国科学家 Chapman^[6]首次提出了臭氧层形成的化学反应机制, 被称为 Chapman 反应:

这里, $h\nu$ 表示太阳紫外辐射, M 代表氮气(N_2)和氧气(O_2)背

图1 2000年9月10日臭氧洞空间分布。蓝色和紫色区域为南极臭氧洞的范围，外围的黄色和红色表示高浓度臭氧区域。图片来自NASA: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/Scripts/big_image.php?date=2000-09-10&hem=S

Figure 1 The Antarctic ozone hole on September 9, 2000. Blue and purple colors indicate the area of the ozone hole, and yellow and red colors indicate high ozone concentration. The figure is from NASA: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/Scripts/big_image.php?date=2000-09-10&hem=S

景气体分子, λ 表示太阳光谱波长。反应方程(R1)和(R2)的净反应是

Chapman 反应的基本原理是: 氧气被波长小于 240 nm 的紫外辐射光解为氧原子, 氧原子和氧气分子结合成臭氧; 另一方面, 臭氧分子被波长小于 366 nm 的紫外辐射光解生成氧原子和氧分子, 氧原子和臭氧分子结合生成氧气。需要指出的是, 在式(R2)中, 氧原子与氧分子并不是每次碰撞都会形成臭氧分子。实际上, 氧原子经历了许多次与 N_2 和 O_2 分子碰撞, 大部分情况下无法生成臭氧分子, 只有在特定情况下, 当第三方(N_2 或 O_2)参与碰撞, 并且吸收了碰撞所产生的能量, 氧原子才能与 O_2 合并生成成为稳定的臭氧分子。Chapman 反应揭示了臭氧的生成取决于两方面的因素: 氧气分子的数量和紫外辐射通量。因为氧气分子随高度呈指数递减, 而紫外辐射随高度增加, 所以, 臭氧层不可能在近地面, 因为近地面紫外辐射太弱; 也不可能非常高的大气层, 那里的氧气分子数量较少。计算表明, 臭氧最大浓度在 25 km 附近, 这与观测事实非常接近。

Chapman 反应机制能够很好地解释臭氧层的存在, 尤其是臭氧层的垂直分布及其最大值的高度。直到 20 世纪 60 年代早期, 人们一致认为 Chapman 反应完满地解释了大气臭氧层的形成。但是, 后来人们发现, Chapman 反应所给出的臭氧含量远高于真实大气中的臭氧含量, 因为在 Chapman 反应中, 臭氧的生成速率大约 5 倍于臭氧的分解速率。按照全球平均的化学反应速率, 在两周内, 臭氧浓度就超过实际臭氧浓度的两倍。这说明还有其他化学反应

图2 1979 年以来, 臭氧洞面积和最低臭氧柱含量的逐年变化。(a) 臭氧洞面积; (b) 最低臭氧柱含量。这里, 臭氧洞面积是以每年 9 月 7 日~10 月 13 日的平均值定义的, 最低臭氧柱含量是以每年 9 月 21 日~10 月 16 日的平均值定义的。数据来自 NASA: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/statistics/annual_data.html

Figure 2 Variations of the area of the ozone hole and the minimum total column ozone since 1979. (a) Ozone hole area; (b) minimum total column ozone. Here, the area of the ozone hole is averaged from September 7 to October 13 for each year, and the minimum total column ozone is averaged from September 21 to October 16. Data is from NASA: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/statistics/annual_data.html

机制导致臭氧加速分解。后来, 催化化学反应被提出, 认为羟基(OH)、氮氧化物(NO_x)^[7]、氯族化合物(CH_3Cl 、 CH_3Br)都可以导致臭氧分解的催化反应发生, 使得臭氧分解速率加快, 以至于臭氧的生成速率和分解速率达到平衡, 并维持现有的浓度。

图3中的黄色曲线就是中纬度地区臭氧的垂直分布。可以看出, 90%以上的臭氧位于大气平流层, 只有一少部分位于对流层, 臭氧最大浓度位于 25 km。臭氧对太阳紫外辐射的吸收对地表生命有着非常重要的意义, 因为紫外辐射对有机生物细胞内的脱氧核糖核酸(DNA)有很大的破坏作用。图3也给出了3个紫外辐射波段在穿越大气层时被臭氧吸收的情况。UV-c 波段(200~280 nm)对有机体的破坏性最大, 但在 40 km 以上就基本被臭氧完全吸收了, 对地表生命没有影响。UV-a 波段(320~400 nm)大部分可以到达地表, 但这部分紫外辐射对地表生命的影响较小, 甚至还有杀菌作用。关键是 UV-b 波段(280~320 nm), 该波段绝大部分被臭氧层吸收, 只有很少一部分能够到达地表。UV-b 波段紫外辐射对地表生命有较强的杀伤作用, 可导致皮肤癌和皮肤灼伤等。如果臭氧浓度降低, UV-b 将对地

图3 臭氧层垂直分布廓线和臭氧对3个紫外波段的吸收示意图。黄线表示臭氧随高度的分布，两条粉红色的直线分别表示大气对流层顶和平流层顶。粉色、绿色和浅蓝色条带分别表示紫外辐射的3个波段。图片来自NASA

Figure 3 Vertical profile of ozone and absorption of three ultraviolet (UV) radiation bands by ozone. The yellow curve is the vertical profile of ozone. Two horizontal pink lines indicate the tropopause and stratopause, respectively. The pink, green, and shallow-blue bands are schematic plots of absorption of UV bands. From NASA

表生命产生强的破坏作用，因此是关注的重点。

在地球历史上，臭氧层的演化对我们认识地球生命的演化也有重要意义。地球大气中氧气的演化经历了3个阶段^[8]，23亿年前，大气中氧气的含量极低，不会形成臭氧层，因此，生命不可能在陆地表面存在，而只能在海洋中存在；23~8亿年前，大气氧含量大约是现代的1%，根据光化学模式估计^[8]，臭氧含量大约是现在的三分之二，这为有机生命在陆地表面的存在提供了条件；寒武纪(5.4亿年前)以来，大气氧含量与现代相当，这不仅为生命的爆发提供了条件(充分的氧气)，也形成了与现代相当的臭氧层，使得生命能够在陆地充分繁衍。

臭氧层的发现不仅增进了我们对大气组分的认识，也改变了我们对大气垂直温度结构的认识。在臭氧层发现之前，人们根据大气辐射传输原理，很容易得出大气在对流层之上是等温。但由于臭氧层对太阳紫外辐射的吸收，在大气对流层之上10~60 km的大气层存在温度随高度升高的逆温现象，而不是等温层或同温层，这就是大气平流层^[9]。

3 人类排放和臭氧洞的形成

如果上述化学反应不受外界影响，臭氧层将处于稳定状态。但人类排放的化学物质打破了这一平衡。早在20世纪70年代，人们曾担心在平流层飞行的喷气式飞机排放的一氧化氮(NO)有可能导致臭氧减少。但后来发现，喷气式飞机排放的NO对臭氧层并没有显著的影响。1974年，Molina和Rowland^[10]首次提出人造氟氯化碳(chlorofluorocarbons, 简称氟利昂(Freon))能够对臭氧层产生很强的破坏

作用。氟利昂最早于1928年人工合成，在之后的半个世纪被大规模生产和使用，主要作为制冷剂被用于冰箱、空调等。氟利昂在对流层非常稳定，生命期达百年。但是，一旦氟利昂随空气上升运动到达平流层，它很容易吸收紫外辐射(波段为190~220 nm)，并被光解，释放出氯原子：

被释放的氯原子参与催化反应，加速臭氧分解：

南极臭氧洞仅出现在南半球的春季，而不是常年存在。从图4(a)可以看出，臭氧洞在8月下旬开始出现，在9月份迅速扩大，在9月中旬~10月上旬达到最大，在11月底消失，臭氧浓度在10月上旬达到最低值(图4(b))，然后开始回升。这说明导致臭氧快速损耗的化学反应与环境条件的季节性变化有关。如图4(c)所示，南极平流层低层最低温

图4 1979~2019年日平均臭氧洞面积、最低臭氧柱含量、南极50 hPa最低温度季节变化。(a) 臭氧洞面积；(b) 最低臭氧柱含量；(c) 南极50 hPa最低温度

Figure 4 Seasonal variations of daily-mean ozone hole area, minimum total column ozone, and Antarctic minimum temperature at 50 hPa averaged over 1979–2019. (a) Ozone hole area; (b) minimum ozone; (c) minimum temperature

度在 8~9 月份降低至 184 K(−89°C). 温度的季节性变化是否是臭氧洞形成的主要原因, 成为了理解臭氧洞形成的关键所在. 1986 年, Solomon 等人^[11]提出异相化学反应是臭氧洞形成的主要原因:

式中, g 表示气态, s 表示固态, 也就是冰晶颗粒. Solomon 等人^[11]认为, 南极平流层在冬春季极低的温度导致了极地平流层云(polar stratospheric clouds, PSCs)的形成, PSCs 以冰晶形态存在. 这些冰晶云颗粒一方面为氯气(Cl_2)的生成提供了更有效的反应表面积(固态颗粒表面的化学反应速率远大于气相化学反应), 使得生成 Cl_2 的化学反应速率大大高于气相化学反应的速率; 另一方面, 反应方程(R10)右边的 HNO_3 冰晶颗粒很快沉降, 使得反应方程(R10)的反应速率加快, 加速 Cl_2 生成, 大量的 Cl_2 能够导致迅速的臭氧损耗. Solomon 等人^[11]提出的异相化学反应机制能够很好地解释 9 月份臭氧快速损耗的观测事实.

尽管 Farman 等人^[1]认为低温是臭氧洞形成的重要因素, 但他们提出的化学反应机制是气态化学反应, 而不是如反应方程(R10)所给出的异相化学反应. 所以, 他们的化学反应机制是不正确的. Solomon 等人^[11]提出的异相化学反应机制很快被 Anderson 等人^[12]的飞机观测所证实. 因此, 南极平流层在冬春季的低温本身并不是臭氧洞形成的直接原因, 而低温所形成的极地平流层冰晶云所导致的异相化学反应才是南极春季臭氧快速减少和臭氧洞形成的根本原因.

除了极低的温度, 太阳辐射也是臭氧洞在南半球春季形成的重要原因. 在南极冬季, 极地平流层温度同样很低, 但臭氧损耗并不多. 但到了 9 月份, 太阳辐射开始照射到南极平流层, 氯气被紫外辐射分解生成氯原子, 氯原子参与催化反应, 造成臭氧快速损耗. 因此, 南极臭氧洞的形成需要两个条件: 极低的温度导致快速的异相化学反应生成氯气; 太阳紫外辐射分解氯气, 导致臭氧损耗发生. 另外, 在南极冬春季, 稳定的极地涡旋也是臭氧洞形成的重要原因. 涡旋外围强劲的西风急流阻挡了中纬度高浓度臭氧进入极地涡旋, 以至于涡旋内部被快速消耗, 但又没有外界臭氧的补充.

为什么臭氧洞仅存在于南极平流层, 而北极平流层不存在臭氧洞? 这是因为北极平流层温度通常高于 200 K, PSCs 不易形成. 另外, 北半球大气波动较强, 北极平流层涡旋在大气波动的作用下很不稳定, 大约每两年就出现平流层爆发性增温的现象. 因此, 虽然北极平流层在每年春季也出现臭氧降低的情形, 但通常达不到臭氧洞的标准. 尽管如此, 北极平流层在 1989、1997 和 2011 年春季也出现了极其严重的损耗^[13].

4 对环境政策的影响以及臭氧洞恢复

虽然科学家们早在 20 世纪 70 年代就提出警告: 人类

排放(尤其是氟利昂)有可能对臭氧层产生破坏作用, 但当时并没有引起环境政策制定者们足够的重视. 1985 年 4 月, 尽管在维也纳通过了有关保护臭氧层的国际公约(《保护臭氧层维也纳公约》), 但该公约对控制消耗臭氧层物质并没有做出约束. 直到两个月后, Farman 等人^[1]发现南极臭氧洞的论文发表, 这才引起了国际社会和各国政府的高度重视. 此后, 在联合国组织下, 召开了一系列政府间工作会议, 制定了氟利昂减排方案和臭氧层保护措施.

1987 年 9 月, 联合国环境规划署在加拿大蒙特利尔市召开了多个国家和国际组织代表参与的保护臭氧层公约大会, 通过了《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》(简称《蒙特利尔议定书》), 并于 1989 年 1 月 1 日起生效. 该议定书提出了减少氟利昂生产和使用, 研发替代物, 并尽快完全取缔氟利昂等条款. 《蒙特利尔议定书》是一个划时代的环境政策, 对保护臭氧层发挥了关键性的作用. 我国于 1991 年加入了《蒙特利尔议定书》. 1989 年 3 月, 联合国环境规划署召开了保护臭氧层的伦敦会议, 1989 年 5 月通过了《保护臭氧层赫尔辛基宣言》. 这一系列的措施使得致臭氧损耗物质的排放很快开始减少, 全球臭氧层在 20 世纪 90 年代末开始缓慢回升, 南极臭氧洞也出现逐渐缩小的趋势.

图 5 来自世界气象组织(WMO)等机构组织各国专家撰写的最新臭氧层评估报告^[14]. 致臭氧损耗物质排放自 1960~1990 年呈增加趋势, 在《蒙特利尔议定书》实施后, 开始迅速下降(图 5(a)). 由于 CFCs 等在对流层的生命期很长, 等效 Cl 平流层氯当量的降低要缓慢得多, 在 1995 年达到最高值, 大约到 2050 年才能恢复到 1980 年以前的水平(图 5(b)). 全球臭氧柱含量在 20 世纪 90 年代中期以前, 呈快速降低趋势, 近 20 年缓慢增加, 预期在 2045 年恢复到 1980 年以前的水平(图 5(c)). 南极臭氧柱含量也是在 20 世纪 90 年代末达到最低值, 然后开始缓慢回升, 大约到 2060 年才能恢复到 1980 年以前的水平, 比全球平均臭氧的恢复速度要慢一些.

5 结语

Farman 等人^[1]关于臭氧洞的发现有以下几方面重要意义:

(1) 首次揭示了臭氧洞存在的事实. 将该发现列为大气科学乃至自然科学历史上的重大发现之一也是实至名归的. 臭氧洞的发现证实了 Cruzen、Molina 和 Rowland 在 20 世纪 70 年代的理论研究成果, 促成了这三位大气化学家于 1995 年获得诺贝尔化学奖.

(2) 臭氧洞的发现促使了国际社会和各国政府制定积极的氟利昂减排和臭氧层保护政策. 这些政策产生了非常积极的效果, 致臭氧损耗物质的排放迅速减少, 全球臭氧层和南极臭氧洞都出现了逐渐恢复的迹象. 臭氧洞从出现到逐渐恢复被认为是人类珍爱地球、自我保护生存环境的

图5 致臭氧损耗物质和臭氧柱含量随时间的变化。(a) 全球平均等效于 CFC-11 的致臭氧损耗物质排放。(b) 全球平均等效于 Cl 的致臭氧损耗气体地表浓度。(c) 全球平均臭氧柱含量。(d) 每年 10 月南极臭氧柱含量。(a), (b) 中白色箭头表明致臭氧损耗物质在何时恢复到 1980 年之前的水平。(c), (d) 中红色曲线为观测值; 黑色曲线表示模拟和预估, 黑色箭头表示臭氧何时恢复到 1980 年以前的水平。图片来源于文献[14]

Figure 5 Timeline of ozone-depleting substances and total column ozone. (a) CFC-11 equivalent emission, (b) equivalent effective chlorine, (c) global-mean total column ozone, and (d) Antarctic total column ozone in October. In plots (a) and (b), the white arrows indicate the timing when ozone-depleting substances return to their 1980 values. In plots (c) and (d), the red curves denote observations, black curves indicate simulation and prediction by climate-chemistry models, and the black arrows indicate the timing when ozone return to their 1980 values. This figure is from Ref. [14]

一个成功典范,说明了人类对环境的破坏可以通过人类自身的努力来控制。

(3) Farman 等人^[1]的论文所产生的重要科学和社会影响又一次说明了,重大科学发现大都源于平凡的开始和不懈的坚守.从 Farman 等人^[1]的论文可以看出,英国南极调查局自 20 世纪 50 年代就开始了南极臭氧柱浓度和垂直廓线的观测.最初的观测只是常规性的,没有人会知道这样的观测将来能够产生如此大的影响.这与 Keeling^[15]在 1958 年开始的 CO₂ 观测类似.最初人们并没有意识到其重要的科学意义,美国国家自然科学基金会对 Keeling 的观测资助了几年后就停止了,认为这只是常规性的观测.但正是 Keeling 不懈的坚守,给出了 CO₂ 不断增加的长期趋势,这是人类燃烧化石燃料导致 CO₂ 增加的直接证据.其实, Cruzen、Molina 和 Rowland 后的诺贝尔奖的理论研究

最初也没有引起很多人的关注,直到 Farman 等人^[1]的论文发表,人们才意识到他们的研究成果的重要性。

(4) 人类对于恢复臭氧层的成功也为我们减缓全球变暖和改善环境污染带来了信心.全球变暖是由于人类活动造成的温室气体增加而导致的,这已是不争的事实.人类完全可以通过自身努力,减少温室气体排放,达到减缓全球变暖的目标.这同样可以应用到环境污染的问题。

(5) 在 Farman 等人^[1]的论文发表之后的 10 年里,学界主要关注的是臭氧洞形成的原因以及臭氧层亏损可能导致的地表紫外辐射增强.近 20 年来,更多的研究表明,臭氧洞的加强和恢复对对流层大气环流和地表气候都有显著的影响.例如,臭氧洞加强(恢复)将不仅能够导致哈德雷环流变宽(变窄)^[16],而且还能够造成南极海冰面积的减小(增加)^[17].

致谢 感谢国家自然科学基金(1530423, 41761144072)资助。

推荐阅读文献

- 1 Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO/NO_x interaction. *Nature*, 1985, 315: 207–210
- 2 Solomon S. The discovery of the Antarctic ozone hole. *Nature*, 2019, 575: 46–48
- 3 Stolarski R S, McPeters R D, Newman P A. The ozone hole of 2002 as measured by TOMS. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 716–720
- 4 Rubin M B. The history of ozone. The Schönbein period, 1839–1868. *Bull Hist Chem*, 2001, 26: 40–56
- 5 Hartley W N. On the probable absorption of solar radiation by atmospheric ozone. *Chem News*, 1880, 39: 111–128
- 6 Chapman S. A theory of upper atmospheric ozone. *R Meteorol Soc Mem*, 1930, 3: 103–125
- 7 Crutzen P J. The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Q J R Meteorol Soc*, 1970, 96: 320–325
- 8 Kasting J F, Donahue T M. The evolution of atmospheric ozone. *J Geophys Res*, 1980, 85: 3255–3263
- 9 Andrews D, Holton J, Leovy C. *Middle Atmosphere Dynamics*. New York: Academic Press, 1987
- 10 Molina M J, Rowland F S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 1974, 249: 810–812
- 11 Solomon S, Garcia R R, Rowland F S, et al. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, 1986, 321: 755–758
- 12 Anderson J G, Brune W H, Lloyd S A, et al. Kinetics of O₃ destruction by ClO and BrO within the Antarctic vortex: An analysis based on *in situ* ER-2 data. *J Geophys Res Atmos*, 1989, 94: 11480–11520
- 13 Hu Y, Xia Y. Extremely cold and persistent stratospheric Arctic vortex in winter 2010–2011. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 3155–3160
- 14 World Meteorological Organization. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018 – Report No. 58*. Geneva: World Meteorological Organization, 2018
- 15 Keeling C D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. *Tellus*, 1960, 12: 200–203
- 16 Hu Y, Huang H, Zhou C. Widening and weakening of the Hadley circulation under global warming. *Sci Bull*, 2018, 63: 640–644
- 17 Xia Y, Hu Y, Liu J, et al. Stratospheric ozone-induced cloud radiative effects on Antarctic sea ice. *Adv Atmos Sci*, 2020, 37: 1–10

Summary for “南极臭氧洞的发现”

The discovery of the Antarctic ozone hole

Yongyun Hu

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

E-mail: yyhu@pku.edu.cn

To celebrate its 150 anniversary, *Nature* collected 10 extraordinary papers published on *Nature* in November, 2019. One of the papers is on the discovery of the Antarctic ozone hole, which was published by three British scientists, Joe C. Farman, Brian G. Gardiner, and Jonathan D. Shanklin, in 1985. They first showed observational evidence that Antarctic stratospheric ozone experienced drastic decrease in the early 1980s, by contrasting to the relative steady state in the 1970s. They also suggested that the ozone hole is due to human-made chlorofluorocarbons (CFCs). *Nature* invited Susan Solomon, who made outstanding contributions to our understanding of the ozone hole, to comment on the paper. She pointed out that “The unexpected discovery of a hole in the atmospheric ozone layer over the Antarctic revolutionized science—and helped to establish one of the most successful global environmental policies of the twentieth century.”

The observational evidence by Farman et al. greatly confirmed earlier theoretical works by P. Cruzen, M. Molina, and F. Rowland who first emphasized in the 1970s that anthropogenic emissions of nitrogen oxides and CFCs would damage the ozone layer. Their observational confirmation led to the winning of the Nobel Prize in Chemistry by Cruzen, Molina, and Rowland in 1995.

The discovery of the ozone hole also led to great international actions in reducing CFCs emissions and protecting the ozone layer, which is crucially important for screening solar ultraviolet radiation for surface life. A series of conventions has been organized by the United Nations, and the most successful one is the 1987 Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. The Montreal Protocol and the succeeding amendments, adjustments, and decisions were subsequently negotiated to control the consumption and production of anthropogenic emissions of ozone-depleting substances (ODSs) and some hydrofluorocarbons (HFCs). Since then, ODSs emissions have been largely reduced and showed rapid decrease since the early 1990s. The global ozone layer and the ozone hole over Antarctic all have showed gradual increasing since the late 1990s. According to predictions of climate-chemistry models, the global total column ozone will return to its 1980 values by 2045 when ODSs decline to very low levels, and the Antarctic ozone hole will recover by 2060. The gradual recovery of the ozone hole, due to reducing anthropogenic emissions, from severe depletion also due to human emissions, is considered a successful story that human can protect their environment through self-efforts. It provides us with the confidence that we are able to reduce greenhouse gas emissions and to solve the problem of global greenhouse warming.

In the present paper, we will first introduce the discovery of the Antarctic ozone hole by Farman et al. Then, we introduce the chemical mechanisms of the Chapman and the catalytic reactions that result in the formation of the ozone layer, and how anthropogenic perturbations caused the Antarctic ozone hole. We shall also introduce the actions that was taken by international communities to protect the ozone layer. In the final section, we point out the important implications of the discovery of the ozone hole.

Antarctic ozone hole, the ozone layer, stratosphere, chlorofluorocarbons (CFCs), climate change

doi: 10.1360/TB-2020-0097