

他曾让NASA和卫星探测陷入尴尬

——记发现南极臭氧洞的英国科学家法曼

■ 贾朋群

如果有人问20世纪最重要的大气探测发现是什么？很多人会提及南极臭氧洞的发现。如果再问20世纪科学界和国际社会最完美的合作有哪些？更多的人会列举出南极臭氧洞的发现、研究和1995年人类保护臭氧层的《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》的出台。而这一切，都与2013年5月11日不幸去世的英国学者法曼（Joseph Charles Farman, 图1）有密切的联系。正是他，仅仅依靠对英国南极站一个点的臭氧观测资料的分析 and 推断，在1985年和同事一起提出了南极臭氧洞的存在，从而加快了科学家对人类活动破坏大气臭氧层的过程和严重程度的认识，并成功促成国际社会采取了还算及时的应对措施。而在世界科学共同体中，法曼和他的同事，通过对单站资料的严谨分析，不仅揭露了一个重要的大气层观测事实，而且，这样一个事实，是因为各种原因一直被埋在掌握最多大气层卫星探测资料的NASA的资料库里的事实。这一过程也让人时常思考：当大气探测已经进入卫星时代的时候，科学家们面对海量数据最需要思考和实践的到底是什么？也许法曼批评管理者在观测

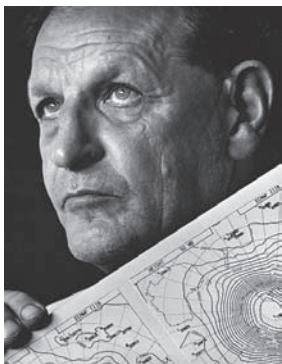


图1 英国科学家法曼（Joseph Charles Farman, 1930—2013年）



法曼和他的同事，通过对单站资料的严谨分析，不仅揭露了一个重要的大气层观测事实，而且，这样一个事实，是因为各种原因一直被埋在掌握最多大气层卫星探测资料的NASA的资料库里的事实。

和模式模拟研究资源分配不合理的话，应该不时让我们想起：“现在有更多的钱投到气候模拟，而在基本科学观测上投入不足，有太多的变量计算机是不可能给出准确预报的……”

一、观测会说话

1930年8月7日，法曼，出生于英国中部小城诺里奇。法曼的父亲是一位个体建筑师，母亲是护士，这位住在父亲亲手建造的家中，从小就喜欢数学，热衷于摆弄无线电设备的淘气男孩，后来在诺里奇有名的高中——爱德华国王中学接受高中教育时，迷上了一本高中生很少涉及的书，讲述相对量力论的《基本理论》。正是这本书，让法曼意识到，人类对自然的认识，是没有疆界的。也许正是受到这本书的启发，后来法曼在剑桥读大学时，选择了数学和自然科学专业。1953年大学毕业后，他先在一家公司工作了3年，1956年进入位于剑桥的英国南极局的前身福克兰岛调查局担任科学官员。在他进入南极局后不久，就赶上了国际地球物理年（IGY）大规模观测活动，法曼随即被派往南极法拉第站度过了两个冬季，从1957年3月到1959年3月。1958—1959年，他还担任南极站长。在南极，他的主要任务，是监督在南极开展的所有物理观测项目。在法拉第站的2年多时间里，法曼目睹和实践着人类对地球环境的监测活动，以及各种监测手段的升

级换代，他还亲自用Dobson光谱仪，在南极开展了最初的臭氧层观测，这样的观测活动，为他日后的重点观测发现埋下了伏笔。

经过了初期学科快速发展和中期进入卫星探测时代的辉煌，到了20世纪晚期，国际地学界似乎进入一种平静期，大规模的探索在有条不紊地部署中，令人振奋不已的事情有些渐行渐远，或者说难以企及。在这样的背景下，当1985年5月16日，法曼和他的同事（图2）在*Nature*杂志上发表了关于发现南极臭氧洞的论文时，不仅赞誉难见，还招来了大气科学界乃至更多领域学者的惊异和随后而来的质疑声。一时间就像平静的环流突然生成了一个活力无比的气旋，正在搅乱已经建立的秩序。为什么？怎么可能就是这样？或者，即使是这样，难道NASA不清楚吗？

这样的反应，一方面源于科学界早就注意到了大气臭氧层和人类活动可能的关系，因此对臭氧层的观测并找寻其是否在减少的努力被很多人知晓。科学家们致力于对平流层环流和化学过程进行研究，并用建立的模式模拟臭氧的变化。但是这些主要由日光驱动的平流层化学反应的模式，都没有指出在南极会出现臭氧层的异常。而且，那时人类对平流层臭氧层的影响，多数人想当然地期待先在白天的热带平流层中发生的化学反应体现出来，而极地平流层低层是排在第二位的



图2 法曼（左1）和1985年*Nature*杂志关于南极臭氧减少的论文另外两位作者（Brian Gardiner（中）和Jon Shanklin（右））在一起

区域，而且要在没有紫外线的黑夜里才有可能。极区甚至被看作是化学反应惰性区域。模式模拟结果主导的结论让科学家们似乎很乐观：人类影响带来的臭氧减少可能仅有2%~3%，这样小的比例甚至很难探测得到。

质疑的另一面，也许更为重要的是，为什么*Nature*的文章仅来自一个英国位于的南极陆地观测站？言外之意是，世界上已经建立了200多个臭氧探测站，即使是在南极，也有17个臭氧测站，这些站大多在1957—1958年国际地球物理年后建立起来，累计观测了相对较长的时间，如果有臭氧含量的显著下降，不该，也不会只有一个站有记录数据。更为匪夷所思的是，人类已经进入卫星大气探测时代，NASA的卫星早就开始了全球臭氧探测，关于大气臭氧层变化的最早、最权威和最全面的信息，难道不该出自那里吗？然而，这些质疑声中，对于作者而言，最有“分量”的是：既然论文给出的数据说明南极臭氧在春季的减少早在1977年就出现了（图3），为什么8年以后才发表文章？作为一种变化趋势的揭示和分析，如果臭氧仅仅是在南极，在春季，突然在1976或1977年开始减少，那么资料累计到1980年就基本可以确认，1981年，最迟1982年就可以发表的文章为什么耽搁了这么长的时间，

作者们在干什么？

二、会让观测说话的法曼

作为*Nature*论文第一作者的法曼，他在英国南极局以对科研工作认真和相对保守而著称，但是在国际大气科学界，在20世纪80年代中期却鲜有人知道其人。面对质疑声，天生严谨且着重于细节的法曼并没有过多辩解。而1986年NASA科学家同样在*Nature*上发表的基于Nimbus-7卫星观测得到的南极春季臭氧减少的论文（图4），更是让很多质疑者为法曼的睿智和探索精神而击掌，后来逐渐被人们所知晓的法曼发现南极臭氧洞的细节，在被人们津津乐道的同时，也带给科技界更多的思考。

在IYG期间全球地面臭氧观测站网建设的热潮，随着IGY的结束而逐渐冷却。很多站后来在人员和仪器，特别是仪器校准等方面，都无法得到资金保障。这使得很多站只能间歇和不定期地报告臭氧观测结果。这一情况到了20世纪70年代初，因为估计到臭氧可能减少而略微有所好转，一些新的臭氧观测站加入全球站网，填补了一些瘫痪或半瘫痪站带来的空白。但是在南极地区，臭氧站大多位于南极圈以外，高纬度站除了英国哈雷湾站以外，法国的迪蒙·迪维尔站那时正处于关闭状态，苏联南极站因恶劣天气也处于找寻新站址的观测不稳定

期，美国位于南极点的南极站，其观测每每到关键时刻就出现仪器问题，这些因素都让英国南极站的臭氧观测，成为揭示新现象最为珍贵的渠道。

在卫星臭氧观测方面，虽然那时卫星每天可以收集覆盖全球的大约14万个观测数据，但是由于当时计算机数据处理水平相对低下，卫星臭氧观测数据先要经过质量控制处理，之后被记录到数据磁带上交给感兴趣的科学家进一步处理。由于那时候还没有可以快速生成全球臭氧分布图的软件，获取的数据磁带大多被堆积在资料库里。

在南极其他站以及卫星臭氧观测过程中发生的情况，实际上也同样发生在英国南极哈雷湾站。一方面，站上使用很长时间的臭氧观测仪甚至需要在冬季盖上羽绒被才勉强工作，观测数据出现些问题看来很“正常”；另一方面，因为南极站获得的大量观测数据中，臭氧资料没有被英国南极局列为优先处理、分析的资料（原因之一是当时科学界认为，平流层臭氧即使减少，也最可能先在赤道地区发生），因此在位于剑桥的南极局，臭氧资料进入计算机进行分析和归档就存在一个5~7年的“滞后

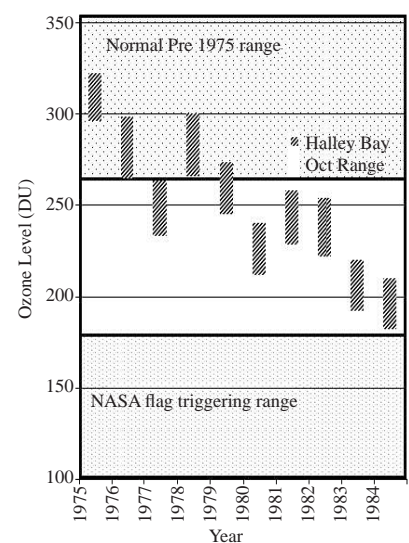


图3 英国南极哈雷湾站1975—1984年的臭氧观测结果以及与1975年前臭氧含量均值（图上部直线）和NASA“臭氧低值”阈值（图下部直线）的对比

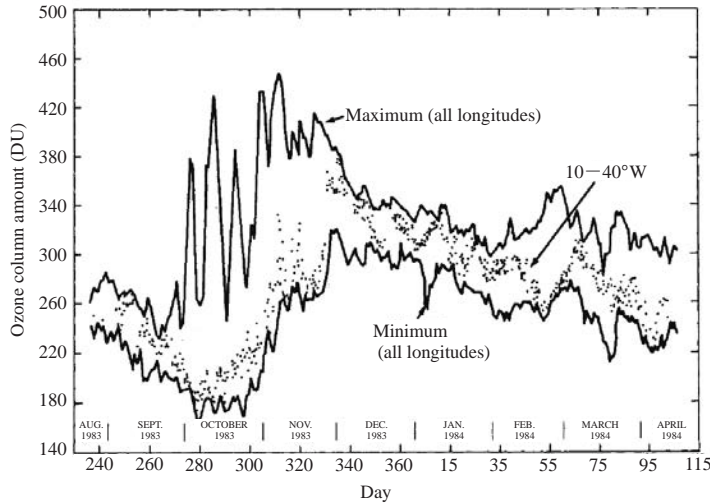


图4 NASA学者1986年在*Nature*上发表论文，用卫星资料证实了法曼的南极臭氧观测结果

期”，即南极臭氧观测资料磁带在运回英国本土几年以后，才会被集中处理。1981年，被积累了好几年的南极臭氧原始资料，终于等到了被送入计算机按照程序进行处理和分析，计算机程序将分光计读数转化为实际臭氧含量并进行分析。而这个批次处理的资料，覆盖了南极臭氧最初开始减少的关键年份。已经出现几年的南极春季臭氧减少，这时才被法曼真实地发现。尽管如此，法曼开始并没有马上确信这样的结果，他首先想到的是控制南极春季的非常不稳定和有时很难预测的环流型，以及伴随的南极冬季极涡的爆发。他感觉，可能春季臭氧水平很不稳定。法曼曾在此前的一篇文章里，阐述南极秋季臭氧变化最能代表全球臭氧含量的改变，因为南极秋季臭氧特别稳定，很少受到其他因素的影响。面对资料显示的春季臭氧快速下降，严谨的法曼也怀疑观测仪器使用的时间太久，或许会发生问题。于是，法曼购置了一台新的Dobson 臭氧仪，被带到南极进行观测。结果，转年南极臭氧观测结果给出了更低的结果。“这真的让人发疯”法曼回忆道，几乎一半的臭氧不见了。他随后让自己静下心来，系统梳理了1975年以来的南极各站臭氧观测记录，发

现只有哈雷湾站出现下降，其他站并未受到影响。于是，转年他又和他的团队来到距离哈雷湾站西北1000英里^①的地方进行观测，同样发现了臭氧减少。这些观测事实，以及从最早发现南极臭氧减少时，法曼就开始找寻南极春季臭氧减少的化学原因，并大胆推测氯氟烃（CFCs）——这种人为制冷剂是导致臭氧减少的罪魁祸首，都坚定了他是时候将这一观测事实发表出来信念。

在1984年底向*Nature*投送只有3页多一点的论文前，法曼向自己提出了3个问题：（1）结果是否有至少另外一个春季结果证实变化趋势？（2）是否对哈雷湾站光谱仪进行了再校准和更换以避免仪器带来的虚假？（3）是否对为何NASA团队还没有注意到臭氧减少给出很好的解释？

在回答这些问题时，法曼认为，哈雷湾站光谱仪的更换，完全排除了仪器问题，而三个季节的数据不仅肯定了异常，而且表明这种减少的趋势还在继续增强。遗憾的是，在试图和NASA科学家取得联系的时候，法曼无功而返。

法曼的论文于1984年12月24日送达*Nature*，后者排除众议，以较快的速度于1985年3月28日接受，并在

同年5月16日刊出。正是这篇经历了坎坷的文章，又一次让全世界关注地球环境问题。

三、法曼带给我们很多

法曼的科研经历，或许可以加上传奇的标签。他的离去，更让我们看清楚了一位敬业学者的风貌。

1. 注重细节的同时，那份执着更珍贵

首先，法曼一生科研经历表现出的最重要的品质，就是注重细节并且执着地坚持自己的主见。他和同事在1985年发表的轰动世界的论文，实际上几近无法发表。其中，不仅有来自权威的NASA不经意间的漠视，更有当时法曼的直接领导试图阻止论文发表的态度。该领导在写给英国气象局的函件里指出：“这篇文章不能发表，因为如果他们的推理是错误的话将会让人耻笑。”虽然目前我们还无法获悉这一表态的具体情况，但是在20世纪后期国际科学界逐步走向中规中矩的场景时，在英国出现这样的抑制创新性科研成果的情况，似乎并不难理解。难得的是，法曼并没有在发现臭氧减少的第一时间就发表，而是在两次赴南极校准资料，并在大气化学领域充分探索了臭氧减少的可能原因，从而更加坚信自己的观测事实之后才提交论文。而*Nature*杂志也没有盲从当时的所谓主流看法，从而让这一开始并不被看好的结果改写了人类认识环境的进程。据传，日本南极站的科学家几乎走了和法曼完全相似的路线，即在日本南极站发现臭氧减少后，首先怀疑仪器问题，接着来回更换和重新标定仪器，甚至还在一定范围内展示了臭氧减少的观测结果，但他们最终没有在科技论文中阐述这一关键的科学事实。也许法曼和日本科学家，在面对原始观测资料的谨慎态度上是相似的，但那份抓住细节的执着和敏锐，让具有更深厚的科

① 1英里约为1.609千米。

学探索传统的英国学者占了上风。

也许全球气象界乃至整个科学界，有很多整天和观测仪器打交道的人，相比较而言，其中成功的人却不多。就南极臭氧洞观测而言，法曼和很多其他学者，特别是NASA握有卫星观测一手资料的学者无疑都等到了机会，这时只有法曼获得了成功，就说明同是观测，面对观测结果，用心思考和执着求解的不挠精神有多么珍贵。如果观测者都是“公事公办”地面对仪器读取的数据，启发人类进步的观测事实的发现，就很难和观测网的完善与观测数据的骤增划上等号。

2. 英国南极站观测设计让法曼能够和NASA平等对话

1995年，也就是法曼发现南极洞的文章发表后10年，当年诺贝尔奖颁发给了提出平流层臭氧减少是受人类活动影响机理的两位环境科学家和一位大气化学家，人们没有在诺奖名单中看到法曼的名字，不少人难以理解并为他鸣不平。实际上，法曼1985年的文章，其最宝贵，也最具有科学价值的内容，是在给出臭氧减少的观测事实之后，科学地预测了这一现象可能的原因。而法曼能够给出南极臭氧减少是因为人为CFCs导致的推测，在很大程度上得益于英国哈雷湾南极站在建立臭氧观测站时，同时开展了包括CFCs在内的大气痕量气体的观测，因此让法曼等科学家不仅仅能得到臭氧观测记录，还能基于CFCs的记录开展臭氧减少原因的分析。这一点从法曼1985年的论文中，用了很多篇幅给出了CFCs记录的分析就不难发现，或许正是这样的分析打动了期刊和论文评阅人。法曼等基于这样的分析，果断推论南极臭氧洞出现的原因是非自然的，而是人为的结果。法曼的工作无疑为科学家们，包括后来获得诺奖的学者更好地揭示南极平流层臭氧减少的机制，打下了坚实的基础。而法曼基于南极一个站的数据，就能给出相当全面的分析，无疑和哈雷湾站

开展了持续、多要素的大气成分观测直接有关。法曼从1957年进入南极局一直到1990年退休一直从事南极观测工作（他在1990年退休前，最后一次赴南极工作），则体现了科学家一生献给科学观测事业的奉献精神。

3. NASA的教训在21世纪更有现实意义

实际上，早在南极平流层臭氧维持正常的20世纪70年代初，科学家就提出了臭氧减少的猜想。但是，后来NASA科学家用卫星探测资料否认了这一猜想，认为其与观测事实并不符合。然而，另NASA懊恼的是，在法曼文章发表后，再次准备反击的NASA却发现，其卫星资料不仅支持法曼的发现，在反复核查南极卫星臭氧观测结果后，更是补充说明在南极出现了一个与美国国土面积相当，并且还在不断扩大的臭氧洞。如果说法曼发现了南极臭氧洞中一个点的深度，那么NASA就更完整地描述了这个洞的范围之大，让臭氧洞更加清晰和准确地展现在世人面前。仅仅是因为大意，让更具资料优势的NASA没能最早指出南极臭氧减少的事实。其中，NASA将臭氧减少的标准定得过低（图3），使得其资料自动处理系统无法被激活并给出提示，是一个很重要的技术原因。还好，NASA就是NASA，他们在法曼发表南极臭氧洞论文后的同年8月公布了南极上空臭氧洞的卫星观测照片，为法曼文章的观点提供佐证，1986年又同样在*Nature*杂志上发表了支持前者观测结果的文章（图4），在平息了争执和让不少圈内人感动的同时，也让人对NASA刮目相看。

然而，NASA当初的惯性、傲慢和忽视给科学界带来的尴尬，在今天几十、上百颗气象卫星在天上飞的所谓“大数据”时代，应该更具有警示意义。技术的进步也许不会再有资料分析的“滞后期”，多平台的观测结果，可以通过实时的多媒体显示，让科学家们可以用指尖

容易地获取。然而，正如NASA制定的臭氧低值的标准很不靠谱一样，一切依靠机器和自动化的资料处理机制总存在弱点，永远也无法百分百地替代“关注细节”和“有责任心”的科学家的工作。气象科学的发展，无疑需要更多法曼式的负责的科学家，甘于在资料的海洋里遨游（图5），第一时间发现关键的科学事实，这样才能让多平台观测网建设的投入，发挥其应有的作用。

此外，在法曼发现南极臭氧洞的过程中，国际著名期刊*Nature*也功不可没。*Nature*作为一份高度国际化的期刊，很难设想法曼论文的审阅者名单里，没有来自NASA的专家，而即使是参与评审的英国本土专家，也不大可能会是一边倒的赞扬声（包括来自作者机构领导的怀疑）。但是期刊的编辑坚信，作者至少在揭示一个站的观测事实上，是经得住考验的。面对这篇没有任何基金资助的文章，期刊还是以较快的速度接受并刊发。更有意思的是，一年以后来自NASA科学家的文章，成功地将法曼文章揭露的科学观测事实，从一个点升级到整个南极地区，从而止住了质疑，转向引导采取国际化行动的国际政治和科学探讨，并最终促成了国际协议的签订和取得实效（链接-1）。

南极臭氧洞被发现的过程，让我们认识了法曼，见证了科学家必须面对的种种挑战，即使到了晚年，法曼念念不忘的，还是第一手观测（图6）。在大气层观测技术

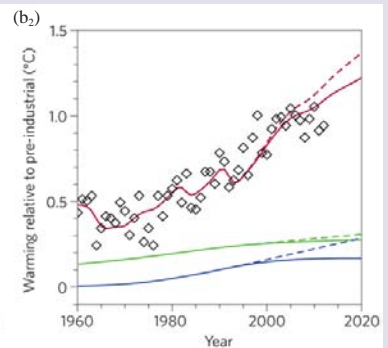
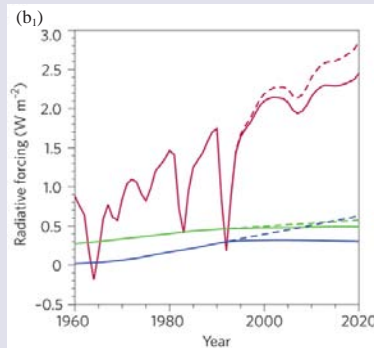
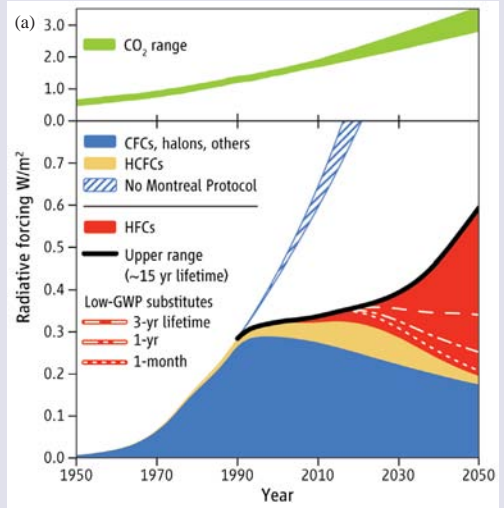


图5 面对大量从南极返回的观测数据，法曼的投入就是深入其中、关注细节

链接-1 《蒙特利尔议定书》的力量：0.1℃

1987年9月16日开始签署，1989年1月1日起生效的《蒙特利尔议定书》可能是最成功的国际环境协议，它有效地抑制了臭氧消耗物（ODSs），例如碳氟化合物（CFCs）和氢氯氟碳化合物（HCFCs）的生产和消费。而氢氟碳化物（HFCs）不破坏平流层臭氧，被认为是ODSs的长期替代物，并没有包括在协议中。但因为大多数HFCs是高效温室气体（GWP），因此《京都议定书》对其进行了限制。尽管如此，《蒙特利尔议定书》对CFCs、HCFCs等的限制已经有效控制了ODSs的辐射强迫作用。图a中显示，如果没有蒙特利尔条约，ODSs产生的辐射强迫在2010年可能会达到0.60~0.65W/m²。而在未来如果可以修订《蒙特利尔议定书》控制HFCs，将能进一步保证其带来的气候效益。

IPCC最新的气候变化评估报告（AR5）更加肯定了人类活动对全球变暖带来的影响，同时IPCC致力于回答影响决策的科学研究到底能否改变什么，显然《蒙特利尔议定书》不容置疑地提供了正能量。图b中描述了《蒙特利尔议定书》通过约束CFCs对全球变化趋势起到的明显减缓作用。不同要素影响着地球能量平衡，其中包括大气甲烷（绿线）和CFCs等其排放受到《蒙特利尔议定书》限制的气体浓度（蓝线）。所有要素共同决定了总的不断变化的辐射强迫（红线），而《条约》的执行拉低了CFCs浓度和辐射强迫（虚线为没有条约的情景）（图b₁）的同时，也改变了温度升高的进程（图b₂，能量平衡模式模拟结果，红线为温度变化，其他同图b₁），即《蒙特利尔议定书》让温度几乎降低了0.1℃，图中方块给出观测到的年均温度及其与模式温度的偏移。



走向成熟，特别是卫星气象观测已经业务化的时候，南极臭氧洞的发现匪夷所思地被延缓了数年，确实给气象界，乃至全球科技界带来了很好的警示，需要汲取的教训耐人寻味。最新的观测显示，南极臭氧洞正在缓慢恢复，但是因为已经进入大气层的CFCs的长生命期，要到

大约2070年才能恢复到其1975年以前的水平。也许逝去的法曼会带着一份无法看到南极臭氧洞复合的遗憾，但他的精神和事业，无疑会激励着更多后来人。

本文由2012年中国科学技术协会学会能力提升专项（优秀科技社团奖）项目资助。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）



图6 2011年，法曼在英国南极局操作Dobson光谱仪

深入阅读

Childs M. 2013. Joe Farman: Scientist who first uncovered the hole in the ozone layer. The Independent, 21 MAY 2013.

Christie M. 2004. Data collection and the ozone hole: Too much of a good thing? In: Proceedings of the International Commission on History of Meteorology 1.1

Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. Nature, 315 (6016): 207-210.

Joseph Farman. 2010—2011. Interviewed by Paul Merchant, National Life Stories, An Oral History Of British Science <http://sounds.bl.uk>.

Pretis F, Allen M. 1993. Climate science: Breaks in trends. Nature Geoscience, 6: 992-993.

Pyle J, Harris N. 2013. Joe Farman (1930-2013) Discoverer of the ozone hole. Nature, 498 (7455): 435.

Stolarski R S, Krueger A J, Schoeberl M R, et al. 1986. Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. Nature, 322: 808-811.

Velders Guus J M, Ravishankara A R, Miller M K. 2012. Preserving montreal protocol climate benefits by limiting HFCs. Science, 335(6071): 922-923.