

论南极 O_3 层空洞的形成及其演变趋势的预测

魏 鼎 文

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100011)

摘 要

本文仔细分析了大量 O_3 观测数据与太阳活动之间的关系, 发现: O_3 总量对太阳准 11 年周期活动的响应, 有“敏感地区”和“不敏感地区”. 以此为依据, 提出了 Chapman 过程作为控制平流层 O_3 含量的主过程之外, 还应有一个次过程. 由此提出了南极 O_3 层空洞形成的新观点, 并对此空洞未来数年的演变趋势, 作了较具体的预测.

关键词: O_3 与太阳活动相关, 敏感相关地区, O_3 洞形成, O_3 洞趋势预测

自 70 年代早期以来, 大气臭氧层在变薄. 特别是在 80 年代中期, 南极地区发现了 O_3 层空洞^[1], 引起了许多国家的科学家的极大关注.

人们最关心的问题之一是: 南极 O_3 层空洞是怎样形成的, 它将如何演变. 本文将以大量地面 O_3 网和卫星观测数据与太阳活动相关的分析为基础, 从一个新的角度来讨论南极 O_3 洞的形成, 并且对未来数年的演变趋势作了预测.

截止到目前, 所得到的信息表明, 对南极 O_3 层空洞作出比较具体预测的, 在世界范围内可能还没有. 因此, 不能排除本文所作的预测带有某种试验性质.

图 1 表示了著名的南极臭氧洞发展演变过程. 这是雨云 7 号卫星 (TOMS) 的观测结果. 图中的 O_3 总量均为 10 月份的平均值. 所谓南极 O_3 洞, 亦均指 10 月份的情况. 由图 1 可以看出, 在 1979 年, 200—250Du 的较低值 O_3 区域才刚刚出现; 然后, 该区逐年增大, 到 1982 年出现了低于 200Du 的区域, 即图中的黑色区. 这个值比正常值低 40% 左右, 以后这一区域逐年扩大, 到 1987 年达到极大. 此外, 在该年还出现了大片的 O_3 总量 $\leq 125Du$ 的可怕的低值区. 但是, 最使人感兴趣的是 1988 年的变化, 该年度的 O_3 空洞范围大大缩小, 不但 O_3 总量 $\leq 200Du$ 的区域小于 1987 和 1986 年, 而且也明显小于 1983 年的面积; 并且 O_3 总量 $\leq 125Du$ 的区域消失. 这也表明: 在 1988 年, O_3 层空洞内的平均含量有极明显的回升. 关于原因下面还要讨论.

一、太阳周期活动与 O_3 总量的相关

关于太阳周期活动, 特别是 11 年周期活动与大气臭氧的相关已有不少研究, 如文献 [2—4]. 一般而言, 所得的结果表明这种相关是比较微弱的, 或者是不完全确定的. 最近 Labitzke^[5]

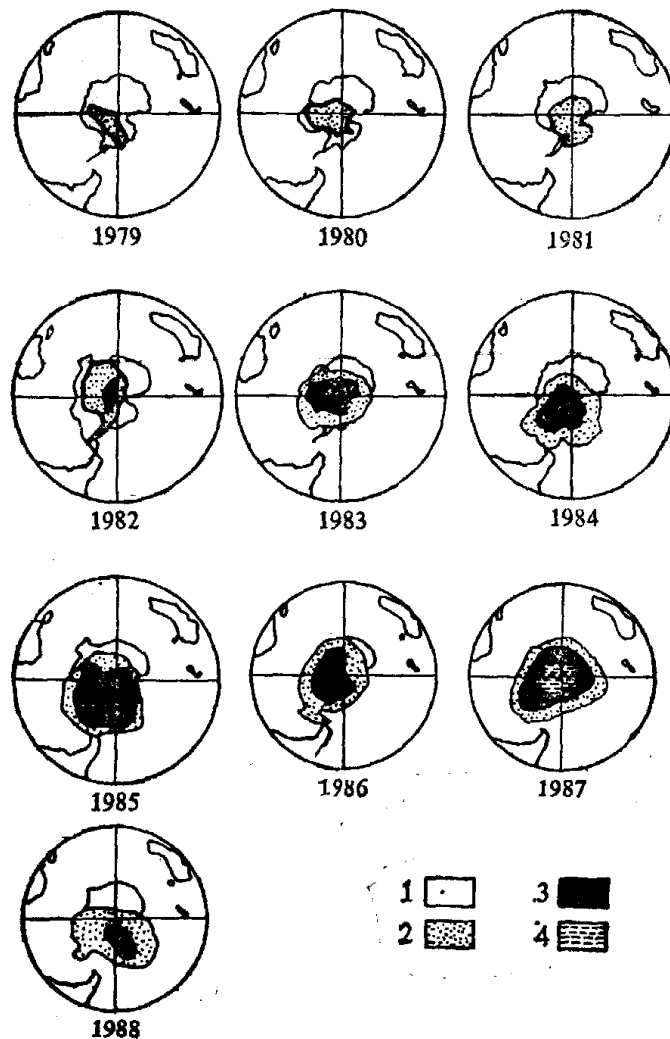


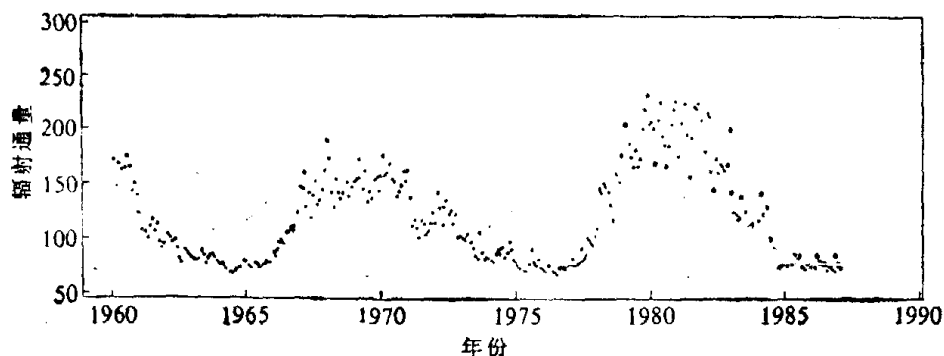
图 1 南极臭氧层空洞的逐年演变

(1— $>250\text{Du}$, 2— $200-250\text{Du}$, 3— $<200\text{Du}$, 4— $\leq 125\text{Du}$)

在这方面取得了进展。她发现当赤道地区 50hPa 层上吹西风时,在北极地区低平流层 (30hPa) 的温度与太阳 11 年周期有良好的正相关,其统计重要性达到 99.8% 以上。

从物理学观点来看,平流层的 O_3 可能是对太阳周期活动反应最灵敏的要素之一,也有可能是联接低平流层以至对流层的大气要素与太阳活动之间的最重要的纽带。

图 2 是 10.7cm 太阳辐射通量(月平均)的逐年变化^[4],它表明了太阳准 11 年周期活动(以

图 2 10.7cm 太阳电磁辐射通量月平均值的逐年变化(辐射通量单位: $10^{-22}\text{WM}^{-2}\text{Hz}^{-1}$)

下均以 QSA11 表示)。

在分析方面,我们有一个良好的基础,就是魏鼎文等^[6]1987 年完成,于 1989 年出版的 1963—1985 年北半球大气 O_3 总量时空变化图集。它比较周密地分析了北半球地面 O_3 网的资料,以冬春半年和夏秋半年两种平均值作等值线图;并给出了网格点值,这些值可以比较多地滤掉观测误差及一些不规则的变化,因而具有较好的代表性。在此基础上,我们利用一些区域 O_3 总量的平均值与 QSA11 作了比较仔细的分析,发现: O_3 总量对太阳周期活动的响应,有“敏感地区”和“比较不敏感地区”。而且此种相关程度也依赖于季节。

这里我们要强调指出,用区域的 O_3 平均量代替单站资料作分析是因为: 单站资料可能具有短期的观测误差,而它的长期资料也可能包含着某种突变的观测误差^[7];并且单站资料也容易受到气象等因素的干扰,所以单站资料一般不大可能反映出它对 QSA11 的明显响应。

图 3 是 $40^\circ-60^\circ N$, $0^\circ-40^\circ E$ 地区(以下称北欧区)的 O_3 总量平均值随时间的变化。这是由文献[6]分析该区域上的网格点值取平均而获得。为滤去准两年振荡,又采取了两年滑动平均。应当指出,该地区测站较密,分析出的结果也较为可靠。由图 3 可以看出两个重要事实: 1. 在北欧地区,冬春半年 O_3 总量有一个非常清楚的准 11 年周期变化。一个峰值出现在 1970 年附近,另一个峰值出现在 1980 年附近。与图 2 太阳活动周期大体吻合。2. 对于夏秋半年,曲线 2 未显示出准 11 年周期变化。

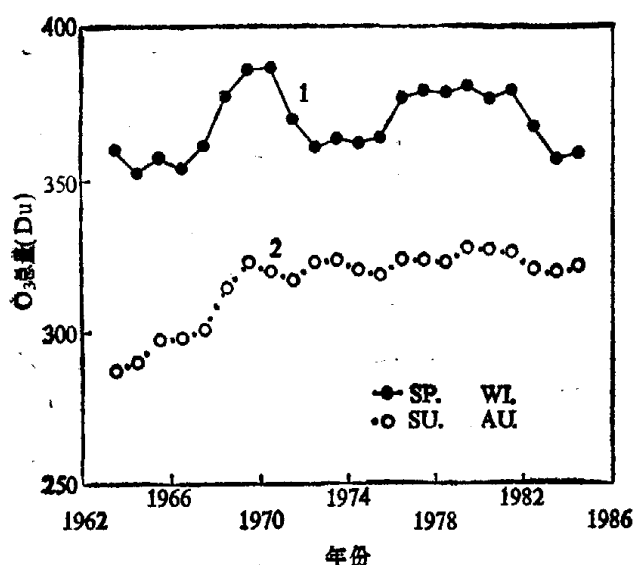


图 3 北欧地区 O_3 总量平均值的逐年变化
(1——冬春半年, 2——夏秋半年)

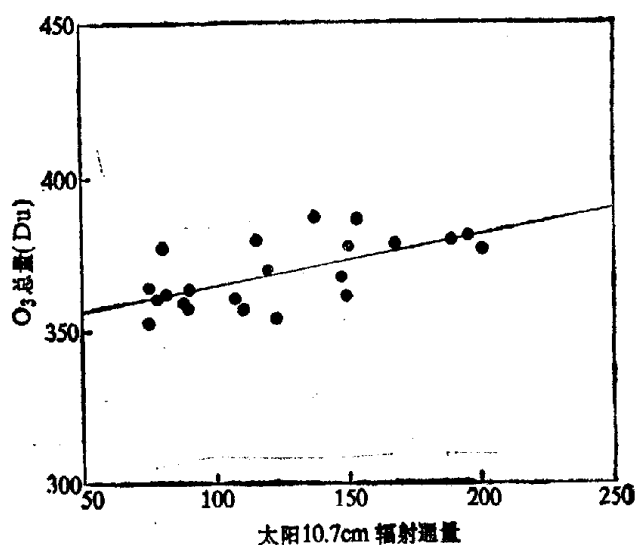


图 4 北欧地区冬春半年 O_3 总量与太阳
10.7 cm 辐射通量的相关分析

图 4 表示了图 3 中的曲线 1 与太阳活动的相关性(太阳活动相应的数据取自图 3), 相关系数达到 0.63, 统计信度在 99.8% 以上, 因此, 在北欧地区冬春半年的 O_3 平均总量与太阳 11 年周期活动之间存在着肯定的正相关。而对图 3 中的曲线 2, 相关系数大大下降, 仅为 0.42(图略)。因而对夏秋半年而言, 该地区的 O_3 平均总量与太阳 11 年周期活动没有明显关系。

为了进一步证实上述结果, 我们应用雨云 4 号 (BUV) 和雨云 7 号 (SBUV) 两个卫星资料作了分析。应当指出的是, 这些资料均已按 Heath^[8], Fleig^[9] 的结果予以修正。由于 BUV 资料在某些月份数据短缺, 所以我们取 4 月份资料代表春季, 9 月份的代表秋季, 以

作为比较. 为了消除 QBO 的影响, 作了两年滑动平均. 图 5 代表了北欧地区 ($40^{\circ}-60^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}-40^{\circ}\text{E}$) 的这种分析结果. 对 4 月份而言, 可以大体看出准 11 年周期. 在 1980 年附近有一个峰值, 1970 年附近有另一个峰值. 但是对 9 月份而言, 曲线却是非常平坦的, 无周期变化. 我们计算了它们与太阳周期的相关系数, 4 月份与 9 月份相关系数分别为 $r = 0.76$ 和 0.47 . 前者的统计信度在 99.7% 以上, 后者无统计重要性. 这一结果无疑支持了上述地面网资料的分析结果.

由以上分析提供出一个极为重要的结果, 对同一地区, 大气 O_3 总量对太阳准 11 年周期变化的响应, 冬春季节大大强于夏秋季节.

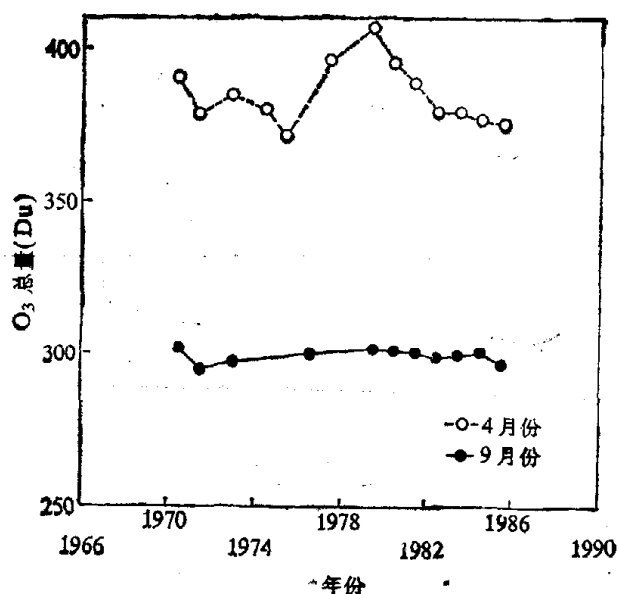


图 5 北欧地区 O_3 总量 (卫星资料) 逐年变化

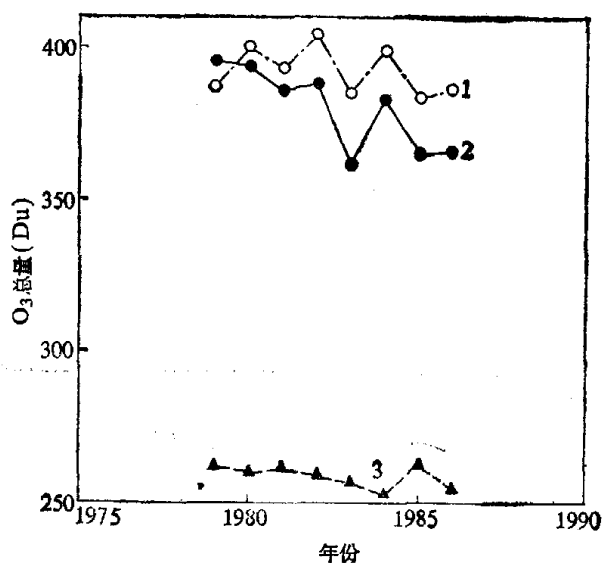


图 6 不同区域的春季平均 O_3 总量的逐年变化
(1— $40^{\circ}-60^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}-170^{\circ}\text{W}$, 2— $40^{\circ}-60^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}-40^{\circ}\text{E}$, 3— $10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$)

下面利用雨云 7 号卫星 (SBUV) 资料, 讨论在相同季节, 而不同纬度和不同地区 O_3 总量对太阳周期的响应. SBUV 资料的起止时间为 1979 到 1986 共 8 年的连续数据, 比较完整且质量较好. 我们已知, 从 1980 年前后至 1986 年是太阳活动第 21 周期的后半期, 属连续下降期, 到 1986 年已接近于最低值 (见图 2), 因此相应的 O_3 平均总量的逐年演变视其下降的程度, 可以估计出其对于太阳准 11 年周期活动相关大小的程度. 图 6 给出了这种情况. 从图 6 看出, 在北欧地区, 平均 O_3 总量的下降达到了 30Du, 这是相当明显的. 与此形成鲜明对照的是, 和北欧相同纬度的东北太平洋地区 ($40^{\circ}-60^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}-170^{\circ}\text{W}$) 平均 O_3 总量的下降仅为 10Du. 更有意义的是, 在低纬赤道区域 ($10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$) 带, 平均值下降趋势已极其微弱, 以至不能分辨出. 它的微小变化已在观测误差范围之内了.

由此, 我们得到了另外两个重要信息, 即 O_3 总量对太阳准 11 年周期变化的相关依赖于纬度, 即相关系数在较高纬度强于低纬度. 这一点, 早些时候 Reinsel^[4] 等也已指出过. 此外, 由该图可以看出, 这种相关程度也依赖于地区. 即虽然地区的纬度相同, 而经度不同, 相关的程度相差也可以很大.

二、关于南极臭氧层空洞的形成

近年来,人们发现人类活动所释放的化学物质,特别是由氟里昂 11 和 12(CFC_{11} , CFC_{12}) 分解出来的氯原子,会消灭大量 O_3 (一个 CFC_5 分子可消灭大约 10000 个 O_3 分子),其主要反应式如下:



而在冬春季节,南极地区的中—低平流层会出现强大的气旋性极地涡旋,并且出现很冷的核。在这种气象条件下,由于上述的化学过程就出现了南极 O_3 洞。这是大多数科学家的认识^[1,10]。

作者认为 CFC_5 等类化学物质对 O_3 层的破坏,具有长期的和潜在的危险性,对它们的生产和消费绝对应当加以限制。但是,根据我们上述大量的数据分析结果,对于南极 O_3 洞的形成, FCF_5 等的化学过程可能不是唯一的;而太阳活动可能是构成空洞的重要原因之一。

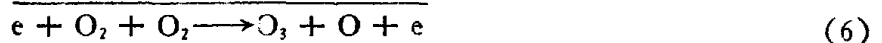
上一节我们详细分析了大量地面和卫星观测资料,得出了几个极为有趣的结果。即地面 O_3 总量对太阳准 11 年周期活动的响应,有“敏感地区”和“不敏感地区”。特别是一般而言,这种响应在高纬度地区强于低纬度地区;冬—春半年强于夏—秋半年。这就引导出下面具有原则性的观点。

著名的 Chapman 理论指明了太阳紫外辐射是控制平流层 O_3 的基本动力。如果这个过程是唯一的话,那么 QSA11 所带来的太阳紫外辐射强度的变化,应当在夏—秋半年大于冬—春半年;低纬度应当大于高纬度,它所给予 O_3 的影响应当是 O_3 总量准 11 年周期变化,夏—秋半年较冬—春半年明显;低纬度区域较高纬度区随明显。但是,上面的分析结果却无情地指出:事实恰恰与此相反。这就迫使我们提出,除了 Chapman 过程作为控制平流层 O_3 的主过程外,还有一个附加过程在控制着平流层 O_3 。

众所周知,在太阳高活动年期间,除了太阳发射短紫外辐射增大之外,最主要的变化是太阳对带电粒子的辐射。据观测估计,高太阳活动年比起低太阳活动年来,这种带电粒子可以高出 10 倍^[11]。而重要的是,由于地球磁场的存在,这种带电粒子只能进入两极高纬度地区,而不能进入低纬度地区。由太阳发射出的带电粒子能够进入地球大气多深,则依赖于它们的能量。在高太阳活动年,大的耀斑爆发后,极光可以扩展到 60° 附近的纬度,而且可以发生在较低的大气层中,就是这些粒子作用的结果。

电子和带电粒子在大气中会产生 O_3 和消灭 O_3 ^[12],而产生的 O_3 量会大于消失的 O_3 量。在这方面一个直接的证据就是:在雷暴时,对流层 O_3 含量明显增加^[13]。下面的模式就是按照上述的思想提出的。由于问题太复杂,目前我们尚不能给出定量的细节,模式将是定性的。

在极地上空,由于太阳带电粒子的入射,产生了下列化学反应^[12]。



(6)式产生 O_3 , 而(7)式消灭 O_3 。我们假定由这种方式产生的 O_3 比消失的 O_3 要多。这里

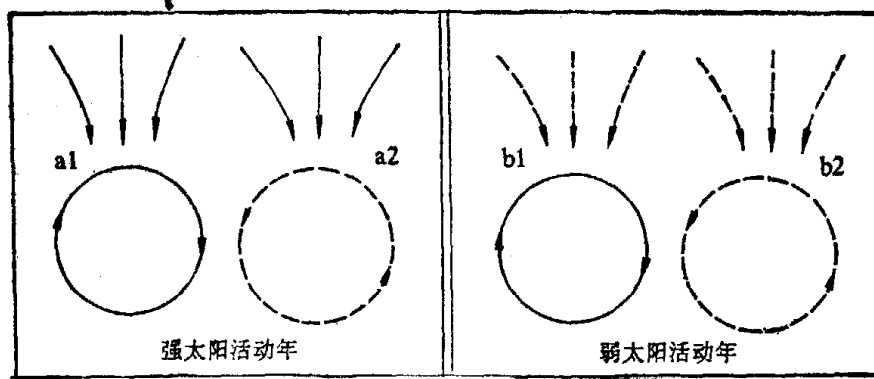


图7 由太阳发射的带电粒子,影响南极区域 O_3 层 O_3 含量的模式示意图

应当作两点解释: 1. 上面的反应式不一定是完备的。2. 可能还有其他更确切的反应式发生在极地上空(由于太阳辐射的带电粒子作用)。但是,我们确信有类似的过程在那里发生。理由则正如下面所论述的那样,本模式可以解释由分析观测事实所提供的结果。

图 7a1 表示在强太阳活动年的冬春半年情况,实线向下的箭头表示强大众多的带电粒子到达南极上空,并在那里按上述反应产生了较多的 O_3 ,通过大气运动,下沉传输到中—低平流层;实线圆圈表示在冬春半年的南极上空,中—低平流层存在强大的气旋性极地涡旋。顺便指出:目前国际上的 O_3 专家们大体上一致认为:这种涡旋的存在,是南极 O_3 洞形成的必要的气象条件。我们同意这种观点,它的基本作用是阻止或减弱经向 O_3 的交换。在此图中,它把由带电粒子产生的 O_3 保存在那个区域,起到了储存“桶”的作用,并且会出现向春末的积累。图 7a2 是夏秋半年的情况,虽然仍有强大的太阳带电粒子到达以产生较多的 O_3 ,但是环流形式变了。虚线圆环表示在这个时段南极地区的中低平流层是微弱的反气旋控制,因而储存“桶”消失了。径向交换较强,产生的 O_3 很快散逸不能产生积累。图 7b1 表示弱太阳活动年的冬春半年的情况。虚线向下的箭头表示弱的太阳粒子辐射。在南极上空,按反应(6),(7)式产生很少的净剩 O_3 ,因而通过向下输送积累的 O_3 就很少,而强大的涡旋却阻止了经向交换,使得低纬度上空的 O_3 难以进入涡旋以内予以补充。而且不能忘记下面的消灭 O_3 的反应,还不停地起作用。



于是在经过了漫长的冬—春半年,到了春末,在涡旋破裂之前,涡旋以内的 O_3 含量达到了最低值,这就可能出现所谓的南极 O_3 层空洞。对于夏—秋半年(图 7b2),虽然由于太阳带电粒子产生很少 O_3 ,但由于环流形式为微弱的反气旋,因而经向交换频繁,所以在那里保持着适当的 O_3 含量。

由以上模式看来: 1. 包括南极在内的高纬度地区是 O_3 总量对 QSA11 的响应最强烈的地区。结合南极地区的大气环流形式,在冬—春半年将会出现非常明显的准 11 年周期变化。特别是在太阳活动极小的年代里,南极地区的 O_3 总量在春末会有明显的降低,这就形成了所谓南极 O_3 空洞。2. 按模式可以看出,在夏—秋半年中,南极地区的 O_3 总量对 QSA11 的响应将是不明显的。3. 由于太阳带电粒子不能直接进入低纬度地区,因而那里的 O_3 总量可能的准 11 年周期变化,不论在什么季节都将是比较微弱的,这就显示出了 O_3 总量对 QAS11 响应的纬度差异(冬—春季节)。如此看来,本模式能较好地定性解释了上述的分析结果。

在北半球有着相似的情况。但是,平流层极地涡旋不像南半球那样典型,因而 O_3 洞也就不会那样典型。特别是在冬春半年有着准两波的环流形式,因此 O_3 总量对 QSA11 的响应除了依赖纬度之外,还会有经度的差异。上一节的数据分析结果已证实了这种推断。

三、对南极 O_3 层空洞未来演变趋势的预测

从图 2 可知,在 1987 年太阳活动达到最低值,然后上升,预计将在 1991 或 1992 年达到峰值。因此,按照上节模型,对南极 O_3 层空洞未来的演变趋势作如下预测。

1. 从 1988 年起,一直到 1991(或 1992)年,南极 O_3 洞将呈现明显减弱趋势,即 O_3 洞的面积将呈明显减小趋势,而洞内 O_3 总量的平均值将呈明显上升趋势。但是在这个总趋势中不排除有较小的准两年周期振荡。

2. 在 1991(或 1992)年以后,南极 O_3 洞又呈增强(或加深)趋势。预测到 1996,1997,1998 年又会重新看到在 80 年代中期(1985,1986,1987 年)出现的明显的南极 O_3 层空洞。这表明了南极 O_3 空洞的填塞与加深也应具有准 11 年的周期变化。

3. 雨云 7 号卫星的观测事实(见图 1)已确切地指出,1988 年的南极 O_3 层空洞已经变弱,即 O_3 洞的面积明显变小,洞内平均 O_3 总量已有明显升高。因此可以说,这已初步支持了我们的上述预测。

4. 在本文第二节的开始,我们已经强调了人类活动所产生的 CFC_s 等类化学物质破坏 O_3 层具有长期的、潜在的危险性。因此,南极 O_3 洞内的 O_3 平均量每隔准 11 年周期的峰值,有可能一次比一次降低,而不能恢复到原来水平。我们必须对此加以密切的分析监视,这对保护 O_3 层,维护人类自身的安全是至关重要的。

这里还要说明一点,目前人们认为对 O_3 洞的形成,除了南极中一低层平流层的强大涡旋是必要的环境条件之外,究竟是 CFC_s 等类化学物质起第一位的或关键作用,还是 QSA11 起第一位或关键作用。我们可以给出一个比较合理的判断:众所周知,当前人们认为破坏 O_3 层的主要化学物质为 CFC_s。而 CFC₁₁ 和 CFC₁₂ 又为最主要的,它们的生命期均很长,其量级为 100 年,而现时 CFC_s 的生产使用仍在逐年增加,因此这种因素使得南极 O_3 洞将愈演愈烈。至于气象的环流因素,即涡旋的强度、形状和涡旋核心部分的温度,可能会有年际振荡。例如准两年的周期振荡。但是这是正常现象,长期的平均应当稳定在一个水平上,这样把以上两种因素加在一起,如果人类活动所产生的 CFC_s 等化学物质是造成目前南极 O_3 洞的第一原因,那么一个合乎逻辑的推论是:在今后几年内(例如 1992 年)该洞将呈现明显的增强趋势,即洞的面积将增大,洞内平均 O_3 总量将明显减少。而如果 QSA11 是造成南极 O_3 洞的第一原因,那么已知上述,它的演变趋势将是 1988 年到 1991 或 1992 年呈明显减弱趋势。因而上述两种原因所造成的南极 O_3 洞的演变趋势是截然相反的。究竟那种是主要原因,让将来的观测事实加以回答。

四、结 束 语

1. 本文关于南极 O_3 层空洞的演变、形成、模式及洞的未来演变趋势的预测,均作了比较详细的论述。但是,应当指出的是,本文所提出的模式及南极 O_3 层空洞的演变预测具有初步的和试验的性质,其正确与否有待事实的考验和更深入的研究。

2. 大气 O_3 层是地球生物体系的一个重要的保护层, 对人类的生存环境有着极大的重要性。但是这个宝贵的层次却是比较脆弱的, 把它订正到标准状态, 其厚度平均只有 0.3 厘米, 因而易受到破坏。本文虽然指出造成目前的南极 O_3 洞主要原因之一, 归于太阳活动的自然原因, 但同时由于人类活动所产生的 CFC, 等类化学物质对破坏 O_3 具有长期的、潜在的危险, 必须限制生产和使用。因为一旦 O_3 层遭到破坏, 恢复将是困难的, 后果是灾难性的。因此, 我们必须密切监测和研究 O_3 层的演变。对幅员辽阔的我国来说, 建立 O_3 监测网是必要的。

3. 长期以来, 人们寻找太阳活动对平流层, 以至对流层等较低层大气的影响, 但结果均不理想。本文所提出的模式或许是这方面一个带有突破性发展。

4. 关于平流层 O_3 的形成, 除了 Chapman 过程作为主过程之外, 还存在着一个亚过程, 即与太阳活动密切相关的由太阳发射的带电粒子流, 会对平流层 O_3 含量作出重要贡献, 特别是包括极区在内的高纬度地区如此。

本文所用的卫星资料是由 A.J. Miller 博士提供的, 作者在访美期间与他作过很有益的讨论, 在此致以深切谢意。

参 考 文 献

- [1] Farman, J. C., Gardiner B. G. & Shamklin, J. D., *Nature*, **35**(1985), 207—210.
- [2] Penner, J. E. & Chang, J. S., *Geophys. Res. Lett.*, **5**(1978), 817—820.
- [3] Reber, C. A. & Huang, F. T., *J. Geophys. Res.*, **87**(1982), 1313—1318.
- [4] Reinsel, G. C. et al., *J. Geophys. Res.*, **92**(1987), 2201—2209.
- [5] Labitzke, K., *Geophys. Res. Lett.*, **14**(1987), 531—537.
- [6] 魏鼎文、郭世昌、赵延亮, 1963—1985 年北半球大气臭氧总量时空变化图集, 科学出版社, 1989.
- [7] Bojkov, R. D., Mateer, C. L. & Hansson, A. L., *J. Geophysics Res.*, **93**(1988), 9525—9533.
- [8] Heath, D. F. et al., *Atlas of Total Ozone (April 1970—Dec. 1976)*, NASA reference publication 1098, 1982.
- [9] Fleig, A. J., Bhartia P. K. & Siberstein, D. S., *J. Geophys. Res.*, **13**(1986), 1359—1362.
- [10] U. K. Stratospheric Ozone Review Group, *Stratospheric Ozone Layer 1988*, London, 1988.
- [11] Gibson, E. G., 宁静太阳(林元章等译), 科学出版社, 1981.
- [12] 王贵勤等编译, 大气臭氧研究, 科学出版社, 1985.
- [13] Vassy, A., *Threshold of Space*, London, 1957.