

我国中层大气臭氧研究的某些进展*

Progress in the Study of Ozone in the Middle Atmosphere in China

王庚辰

(中科院大气物理所, 北京 100029)

一、引言

中层大气臭氧的研究在整个大气臭氧研究中占有特殊地位。大气中的臭氧层主要由太阳紫外辐射对大气中氧分子的光解而形成,因此其含量主要集中在平流层中。臭氧浓度及其变化是决定平流层、中间层的物理、化学和动力学状态的重要因子。正是由于这一原因,一些国际和有关国家的中层大气研究计划中都把臭氧研究摆在重要位置。但是,对中层大气臭氧的研究是一件不容易的事,它涉及平流层、中间层大气中辐射、化学和动力学状态,尤其是涉及臭氧及其有关气体复杂的光化学过程,其中有一些耦合和反馈过程至今尚不清楚,另外在探测技术上也有特殊的难度。这些正是中层大气臭氧研究,尤其是在探测技术方面进展缓慢的原因所在。近十多年来,激光探测技术和卫星遥感技术的应用使对平流层、中间层大气臭氧的探测取得了明显的进展。到目前为止,用在卫星(或其它空间飞行器)上对平流层、中间层大气臭氧进行遥感探测的各类仪器已达 20 多种,用于从地面探测平流层、中间层大气臭氧的专用或多用激光雷达也已有 10 多种。卫星遥感是获得中层大气臭氧信息的有效方法,其技术可分两大类,其一是借助安放在卫星上的相应仪器来探测天顶方向的后向紫外散射辐射的强度而获得臭氧资料,其典型仪器是放置在雨云 7 号卫星上的太阳后向散射紫外光谱仪(SBUV);另一类是在红外波段进行临边发射(或吸收)测量来获得不同高度上的臭氧信息,其代表性仪器是放置在雨云 7 号卫星上的平流层临边红外监测器(LIMS)。目前用于臭氧探测的激光遥感技术大多基于距离分辨率的差分吸收原理,其中使用最广泛的是 Xe-Cl 脉冲激光雷达。

我国在中层大气臭氧探测方面起步较晚,直到

80 年代初期,随着激光、微波、平流层气球、计算机等技术的发展和在大气科学研究中的应用,随着全球变化以及日地物理等研究需求的迫切性的增加,高空大气臭氧探测技术和相应的研究才有了相应的发展,并且在近些年来获得了明显的进展。

二、当前中层大气臭氧研究中的若干前沿科学问题

中层大气臭氧是中层大气研究中的核心研究内容,是当前地球科学和空间科学界共同关注的重点科学问题,在全球变化等研究中占有特殊的重要地位,因此,在当前重大国际研究计划(如 IGBP、WCRP 等)的有关核心计划中都涉及中层大气臭氧的研究。当前,中层大气臭氧研究中所提出的有关前沿科学问题归纳起来有下述几个方面:

1. 中层大气臭氧变化趋势及有关过程研究

中层大气臭氧的变化趋势是中层大气臭氧研究中人们所关心的焦点问题,研究重点是不同层次高度上臭氧的分布和变化特征、中层光化学过程、动力学过程,其中包括波一流相互作用等对中层臭氧分布及变化的控制过程、厄尔尼诺事件、准两年振荡(QBO)等对平流层臭氧输送的影响等等,由于问题本身的复杂性和资料的缺乏,其进展比较缓慢。

2. 中高纬平流层低部臭氧浓度变化及原因分析

观测资料表明,中高纬度地区平流层低部的臭氧耗损速率约为每十年 10% 左右,且冬春季大于夏季,形成了令人关注的北半球冬季平流层臭氧耗损现象。目前仅含气相化学的模式还不能模拟观测到的这种臭氧消弱,虽然有些科学家加入了硫酸盐气溶胶的多相过程,但仍解释不了臭氧浓度在整个中纬度地区的下降。因此,北半球冬季臭氧耗损原因及趋势仍是当前中层臭氧研究乃至全球臭氧变化

* 国家自然科学基金资助项目

研究的重要内容。应当指出,在评价平流层下部臭氧变化趋势方面,SAGE I/II, SBUV 以及臭氧探空等资料之间有着明显的差异。

3. 极地平流层臭氧耗损的机制和过程研究

近些年来南极臭氧洞持续发生并有加强的趋势,北极上空臭氧含量也有明显耗损趋势,有关证据表明,含有氯和溴的多相化学过程以及环极涡旋的存在是极区臭氧浓度耗损及臭氧洞得以维持的主要原因。当前,南极臭氧洞演变的一个引人注意的现象是,自 1990 年以来,臭氧洞的维持时间有延长的趋势,有的年份可维持到夏末,不仅如此,当平流层臭氧耗减时,对流层也出现了臭氧损耗现象。

4. 火山气溶胶对平流层臭氧浓度变化的调制作用

火山爆发排放的大量火山硫酸盐气溶胶滞留在平流层低层,会大大促进多相化学过程的发生,进而导致臭氧浓度的下降。已有证据表明火山爆发后,平流层臭氧浓度普遍出现了下降,但对火山气溶胶影响平流层臭氧的强度却有着不同的估计。有的观测资料表明,火山气溶胶对平流层臭氧的调节作用不会超过 2~3%,1992~1993 年期间全球臭氧下降主要应归于 QBO。与此同时,有观测发现,火山爆发之后平流层下部臭氧浓度下降而平流层上部(25 公里以上)的臭氧浓度却略有上升。

5. 平流层臭氧对温室效应导致的辐射扰动的敏感性研究

温室效应增加会导致平流层冷却进而会影响平流层的动力学过程和臭氧的重新分布。平流层变冷导致光解作用减弱,可减少臭氧的衰减率,但臭氧浓度增加和太阳紫外加热增加,反过来又会部分地补偿平流层的冷却,温室效应增强可能引起的平流层环流变化以及对臭氧的影响只有使用具有 GCM 风场的三维化学输送模式才能得到。

6. 中层大气臭氧浓度变化的潜在影响效应研究

平流层臭氧减少不仅会对平流层的热力和动力过程产生影响,而且会使到达地球表面的紫外辐射增加,进而会产生相应的气候效应和生物效应,会使生态环境的研究和全球或区域尺度上的气候变化研究工作进一步复杂化。不仅如此,平流层臭氧浓度耗损可能产生的“稀释效应”和可能引起的对流层臭氧耗损也是当前中层大气臭氧研究中人们所关注的问题。

7. 中层大气臭氧变化对太阳活动的响应

全球臭氧变化与太阳活动存在着较好的相关性,多数研究结果表明,大气臭氧变化显示出准 11 年周期振荡,并与太阳黑子相对数 11 年周期变化密切相关。对各纬圈臭氧年均值分布的进一步分析还发现,在低纬和高纬地区臭氧总量变化对太阳 22

年周期性变化的响应较强。当前人们关心的问题是 30~50 公里高度范围内臭氧变化对太阳周期活动和瞬息活动的响应特征。

三、我国中层大气臭氧研究的某些进展

1. 探测技术和方法

(1)球载臭氧分析仪技术的发展 80 年代以来,我国高空科学气球技术得到了迅速发展并在空间天文、空间物理、大气物理、环境科学等领域进行了成功的实验研究。与此同时,借助高空科学气球测量高层大气臭氧的技术也得到了发展,并于 80 年代末首次在国内研制成功了球载臭氧分析仪,实现了对平流层臭氧的直接测量。球载臭氧分析仪属紫外吸收法类型,整套仪器包括样品气体采集、光度测量及数据采集处理三大部分。其工作原理是:让被测环境中含有臭氧的介质连续通过专门设计的样品池,同时选择对臭氧有较强吸收能力的紫外辐射通过该池,这样根据所选择波长处紫外辐射强度的变化来推断介质中臭氧的含量。实际测量时,球载臭氧分析仪及相应的电源、遥测、遥控等系统被放置在一个专用的吊篮内,除采样头外,其余部分均被保温材料封闭在吊篮内,由 1~3 万立方米的气球牵引施放。用专用雷达系统跟踪以随时监测气球的飞行状态,并按预定计划或需要控制气球的飞行高度和飞行时间,最后通过切割操作命令使吊篮脱离气球并借助降落伞着陆回收。采用本技术曾成功地获得了平流层中下部的臭氧资料。

(2)大气臭氧探空仪 为适应我国中层大气臭氧研究的需求,在 80 年代末研制成功了用于直接测量大气臭氧垂直分布的电化学型大气臭氧探空仪,其工作原理是让大气中的臭氧与碘化钾溶液发生反应,根据所产生的传导电流大小来推断参与反应的臭氧量。臭氧探空仪的全套装置包括传感器(臭氧、大气温度和大气压力)、电信号处理、转换和发送系统以及地面接收和处理系统,对整套装置的结构合理性、测量时间常数、抽气泵的效率、臭氧反应中的电流转换效率及反应液的变化等参数在实验室内进行了多次测试,并对关键性部件进行了环境模拟试验。借助小型标准臭氧发生器和标准臭氧分析仪对臭氧传感器和臭氧探空仪整体进行标定。

利用所研制的大气臭氧探空仪,从 1989 年开始曾先后在北京地区和南极中山站对大气中臭氧的垂直分布进行了直接测量,获得了 0~30 公里高度范围内的大气臭氧资料。

(3)激光雷达探测技术 我国在应用激光雷达技术进行大气探测方面起步较早,并在激光大气遥感理论、能见度测量、平流层气溶胶探测等方面取得了可喜的进展。但是此项技术发展比较缓慢,与

国外相应研究工作,尤其是在大气臭氧探测技术方面差距较大。近些年来,应用激光雷达技术探测大气臭氧及其它大气微量气体工作受到了有关部门的关注并开始了有关理论研究和理论筹备工作。目前,国内有关单位已提出了利用激光雷达技术探测高层大气中的臭氧垂直分布的具体实施方案,作为第一步将采用 YAG 倍频输出和 Xe-Cl 激光雷达进行距离差分吸收测量获得臭氧垂直分布资料,与此同时,喇曼频移及相应大气臭氧探测技术和理论研究工作也在相应发展。

(4)地基微波遥感技术 这是国内近几年来发展的从地面探测中层大气臭氧浓度及其日变化的技术之一。观测所使用的设备实际上是一台带有望远镜系统的微波波谱仪,为提高信噪比采用了致冷、锁相环、光声接收池等技术。此技术实际上是测量位于某一选定频率处(如 110 千兆)的臭氧转动发射谱线的轮廓,获得相应的亮度温度,然后反演得到臭氧浓度。调整观测频率,选择相应的权重函数可获得不同高度处的臭氧浓度及其变化特征。

(5)其它探测技术 除上述提及的臭氧探测技术外,国内还先后发展了其它技术对高层大气中臭氧进行观测,其中主要有:

曙暮光测量技术:采用多通道曙暮光光度计在曙暮期间测量臭氧夏皮尤吸收带范围内某些波长处在不同天顶角和方位角情况下天空散射光强度的变化来获得 40~60 公里高度范围内的臭氧浓度。

气辉辐射测量技术:即测量氧分子 1.27 微米带激发态的曙暮气辉辐射强度,反演获得 60 公里高度以上的臭氧分布特征。

紫外辐射测量技术:采用多通道紫外辐射测量技术,借助我国空间科学卫星,利用掩日法测量选定紫外波段处的紫外辐射强度变化来获得 50~70 公里高度范围内的臭氧信息。

(6)地基遥感反演方法 在地面获得的高分辨率太阳光谱中,含有不同高度大气组分的丰富信息,近些年来我国科学工作者利用半球辐射光谱强度比,用退卷积等方法,进行了反演大气臭氧总量和臭氧垂直分布的试验,并取得了较好结果。

(7)空间遥感反演方法 卫星遥感是获得大范围、连续臭氧资料的有效手段。我国科学工作者发展了相应的反演技术并利用卫星遥感资料得到了平流层臭氧总量和臭氧的垂直分布曲线。

2. 主要研究结果

(1)北京地区上空臭氧浓度分布和变化特征 根据对地基遥感、直接测量和卫星资料反演等获得的资料的分析,基本上可以认为北京地区上空平流层臭氧的分布和变化具有如下特征:自 1979 年以来北京上空臭氧总量呈下降趋势,其中 28 公里以

上臭氧变化率稍大于平流层下部的臭氧变化率;臭氧含量随高度的分布在多数情况下呈多层次分布结构,尤其是夏季,双峰分布结构明显,除位于 20~25 公里高度之间的臭氧极大值外,在 10 公里左右,往往出现次极大值。

(2)北京地区上空臭氧含量的季节性变化 初步研究结果表明中层大气中各层臭氧含量具有明显的季节变化,但位相不同。20 公里以下臭氧含量的季节性变化与臭氧柱总量的变化基本一致,即最大值在春季,秋季最小,在 20~28 公里层,极大值出现在冬季,在 28~36 公里层极大值在夏季,而 36~60 公里层臭氧极大值在 11~12 月,最小值在 6 月左右,对这种层次分布特征应予以相应的光化学过程和动力过程的解释。

(3)40~60 公里高度范围内的臭氧变化 对微波观测和曙暮光观测资料的分析表明,臭氧量随高度的分布基本上呈波谷型和陡降型两种类型,并呈现明显的季节变化,即在这一高度范围内,冬季臭氧浓度总是比较高,夏季臭氧浓度总是比较低。

(4)我国大陆上空平流层臭氧分布特征 利用卫星资料对我国上空三个纬度区域(20~30N,30~40N,40~50N)多年来月平均平流层臭氧量分析表明,三个区域的臭氧量均有显著的季节变化,北区和南区臭氧量季节变化几乎反相,即在 20~30N 区内臭氧量冬低夏高,而在 40~50N 区内臭氧量是冬高夏低,并且季节变化的振幅随纬度增高而增大,与此同时,臭氧浓度极大值的季节变化幅度也随纬度增高而增大。

(5)太阳活动对中层臭氧浓度变化的影响 对太阳活动峰年和静年的曙暮光观测结果的分析表明,在中纬度地区,50 公里左右高度上的臭氧浓度对太阳活动较为灵敏。从 1989 年到 1995 年,这个高度上臭氧浓度平均减少了 8%左右(同期 10.7 厘米射电指数由 200 个单位下降至 70 个单位)。不仅如此,太阳的瞬息性变化会直接影响到中层大气臭氧浓度的变化。强大的太阳耀斑和质子事件会引起强烈的地磁扰动,这期间在 40~50 公里高度范围内观测到了臭氧浓度的大幅度下降和中间层底部(50~60 公里)臭氧浓度的增加,强大的太阳耀斑爆发可能是这种臭氧浓度变化的直接原因。此外,通过对较长期间在北纬 10~70 度各纬圈的年均臭氧量进行分析表明,在低纬度和高纬度区,臭氧总量对太阳活动 22 年周期变化响应较强,而中纬度地区,臭氧总量变化则对太阳活动 11 年周期变化有较强的响应。

3. 南极大气臭氧洞研究及主要结果

当前,南极臭氧洞研究已成为南极研究的重要内容,因为它直接关系到全球气候环境的变化,关

(下转第 41 页)

为有限责任公司或股份有限公司,使之真正成为产权清晰、权责明确、政企分开、管理科学、自主经营、自负盈亏、自我发展、自我约束的法人实体和市场竞争主体。

(2)水电开发涉及到电力工业、江河治理、综合利用、地区经济发展等复杂的社会经济关系。自1988年水利电力部撤销后,出现的不少问题不能得到有效、及时的协调解决,不利于水电、水利和电力的协调发展。为此,建议成立水电开发总公司(企业,目前可隶属于全国电力总公司),其职能是负责全国大、中型水电站的开发,是水电开发公司的控股公司。建议国务院授权它作为一级国有资产的代

道,筹集建设资金;协调各有关方面(部门和地区)的经济利益关系,促进水电稳步、快速发展。

5. 今后水电开发的重点。

首先,要特别重视西南和西北的水电开发,中共中央的建议中明确指出:国家要采取有力措施,支持中西部不发达地区的资源开发。我国的水力资源最为丰富的地区是西南和西北(仅金沙江水电基地的开发即相当于4个三峡水电站)。把开发西部水力资源作为地区资源开发的先导,这对于繁荣我国西部经济,缩小东西部地区差距,确保社会长治久安,实现“西电东送”具有重大的社会经济意义。建议将其作为优先开发水电战略决策的重中之重来安排实施。

我国东部地区水力资源比较少,且开发程度已较高,今后除继续兴建一些条件较好的中小型水电站外,还要着力于改善电力系统运行调度条件,提高电网安全、经济的运行水平,适当开发一批各种规模的抽水蓄能电站。(责任编辑 蔡德诚)

(上接第37页)

系到对南极在全球变化中地位的评价。我国科学工作者在国家南极研究计划的支持下,对南极地区大气臭氧的变化进行了观测和分析研究。为此先后在中山站投入运行了天光光谱仪、Brewer 臭氧测量、大气臭氧探空仪、激光雷达等观测设备。重点观测和研究的内容包括南极大陆地区大气臭氧总量的变化,南极臭氧洞期间大气臭氧的垂直分布特征,极地平流层云及其在南极臭氧洞形成和演变中作用等,同时开展了极区平流层多相化学过程及臭氧形成机理的模拟研究。

研究结果表明:

(1)南极臭氧洞主要发生在8~11月期间,臭氧含量的耗损主要集中在平流层下部。

(2)由于中山站地区处臭氧洞边缘,因此在臭氧洞期间观测到的中山站上空臭氧含量的垂直廓线图象比较复杂。同时,在短时间内臭氧浓度有较大幅度上升或下降的变化特征。

(3)极区平流层臭氧变化与硝酸三水合物(NAT)凝结温度有明显关系,当平流层温度下降至低于NAT 凝结温度以后,臭氧浓度首先停止下降,并经过一段时间延迟后,臭氧浓度大幅度上升,但臭氧变化与NAT 凝结温度关系的变化过程并不是单调的。

(4)从激光大气回波信号获得的平流层气溶胶浓度的垂直分布以及13~30公里高度范围内的气溶胶浓度表明,1993年南极平流层气溶胶粒子含量比1990年明显增加,证实了南极冬季平流层云的存在。对流层气溶胶垂直剖面分析显示了1993年

平流层气溶胶的双层结构,即12公里附近高度上始终存在着一层厚度为数公里的气溶胶层,25公里高度附近冬季有明显的气溶胶层,其它季节则变化较大。

四、结束语

1. 中层大气臭氧研究是当今地球科学和空间科学界共同关注的焦点科学问题之一,研究的重点是全球臭氧耗损变化趋势及其对全球气候、环境变化的影响。

2. 我国近十年来在中层大气臭氧研究方面取得了明显进展,主要表现在球载臭氧分析仪、大气臭氧探空仪、激光雷达臭氧探测、地基微波遥感臭氧、曙暮光测量、气辉辐射测量、紫外辐射测量等臭氧测量技术的发展以及相应的地基遥感和空间遥感臭氧反演方法的建立等方面。与此同时,通过地基和空间观测资料的分析以及相应的模式研究获得了我国大陆上空平流层臭氧分布和变化,尤其是北京地区上空平流层臭氧分布和变化的基本特征。在研究太阳活动对中层大气臭氧影响方面也取得了许多有价值的新结果。

3. 对南极上空的臭氧变化、臭氧洞形成机制等进行了地基遥感、直接测量以及相应的理论模式研究,对南极上空臭氧洞的演变过程,极区平流层云在臭氧耗损中的作用,南极臭氧洞期间臭氧浓度变化及臭氧垂直分布特征等问题有了进一步的认识。

(责任编辑 刘先曙)