

平流层和中间层大气研究的进展

吕达仁 陈洪滨

(中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029)

摘 要 平流层和中间层大气研究是 20 世纪 70 年代以来持续得到大气科学界和日地物理界共同关注的研究前沿。中国科学界在文化大革命结束后立即抓住这一前沿作为发展重点之一。20 多年来, 中国科学院大气物理研究所等单位较为系统地开展了这一方向的研究, 并在一些方面进行了前沿性的工作。作者着重介绍以下几方面的进展: (1) 平流层和中间层大气探测设施与探测方法; (2) 大气臭氧、平流层气溶胶的监测与分析; (3) 行星波在中间层大气环流与大气臭氧分布中的作用; (4) 重力波在中间层大气的传播特征与作用; (5) 平流层—对流层交换的动力物理与化学问题。

关键词: 中间层大气; 大气臭氧; 气溶胶; 重力波; 行星波

1 引言

中间层大气一般指高度介于 10~100 km 的大气层, 包括大气分层中的对流层上部和对流层顶、平流层顶、中间层及中间层顶、以及低热层, 其主体部分为平流层和中间层。对该层大气情况的了解及其作用的研究长期以来比较微薄。究其原因最主要的是该层作为稀薄的中性大气, 探测十分困难, 因而难以作系统分析研究。20 世纪 70 年代中期以前, 该层大气的工作主要在依赖于气象探空观测低平流层气象要素的分析、极少数的气象火箭和探空火箭对平流层和中间层的观测、以及立足于地基 Dobson 光谱仪对平流层臭氧的观测, 并未能形成对该层大气整体情况的了解, 也难以对其重要性作出判断。只有到 20 世纪 70 年代中期以后, 由于 MST 雷达等新探测技术的出现和应用, 同时由于大气动力学、物理学对于对流层大气的研究进展, 开始认识到对流层天气气候和环流过程的发展演变迫切需要了解与作为上边界中间层大气的耦合。另一方面, 电离层和热层的探测研究中也发现了该层特征的变化明显地受到来自下部的对流层和中间层大气的作用, 特别明显的是声重波特征, 因而迫切需要了解中间层大气在其中的作用。对于中间层大气本身研究的驱动力则首先来自大气臭氧的变化研究。人们早就知道, 大气臭氧由于其强烈吸收 UV-B (280~320 nm) 生物有害紫外辐射, 起着地球生物圈保护伞的作用, 而大气臭氧的主要部分集中于平流层。20 世纪 60 年代以来, 由于担心人类活动和高空飞机对平流层的排放会破坏臭氧层, 导致灾难性的后果, 因而逐步加强了以臭氧为中心的中间层大气成分与状态变化及其自然源、人为源作用的研究。在 20

2003-02-10 收到, 2003-05-14 收到修改稿

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目“北京地区平流层—对流层交换基本过程”和国家自然科学基金资助项目 40075007 共同资助

世纪 70 年代初,发现了人类生产的氟利昂化合物一旦通过垂直输送进入平流层就会引起破坏臭氧的催化反应,由于近 20 年以来臭氧已成为全球环境与气候变化研究的前沿,大大推进了大气臭氧层的探测与监测,并深入开展了大气动力—光化学模式研究,在此基础上促成了世界保护臭氧层公约的诞生。中层大气内存在复杂的波一流和波一波相互作用,即基流、行星波、重力波及湍流之间的相互作用造成了中层大气复杂的动力学图像,成为一个检验和发展动力学理论的巨大天然试验室,吸引了大气科学家和空间物理学家来共同关注这一领域。20 世纪 70 年代中期开始,以国际日地物理科学委员会 SCOSTEP 组织的中层大气研究计划 MAP 和 WMO 所主持的大气臭氧研究计划为起点,中层大气研究成为地球(大气)科学和日地物理界共同关注的新重点,以 Pre-MAP、MAP、MAC 为代表的中层大气研究获得长足的发展,逐步形成了日地系统整体行为的研究主题。同样,20 世纪 80 年代起 WMO 的大气臭氧评估工作越来越引起人类的共同关注,南极臭氧洞的发现使这一问题更引起重视。由于臭氧层变化与人类活动排放温室气体的密切关系,气候变化中中层大气的成分与动力过程变化及其对天气气候的影响也得到了十分重视,WCRP 于 1992 年起设立了 SPARC(平流层过程与其气候作用)研究计划,进一步推进了大气上下层相互作用的气候预测重要性。

中国的中层大气研究始于国际地球物理年(1957~1958)。赵九章等前辈学者预见中上层大气研究在大气科学与航空航天应用中的重要性,积极倡导这一国际合作前沿研究^[1]。从那时开始了大气臭氧的观测研究,作为大气动力学研究部分的低平流层研究亦有所进展。20 世纪 60 年代开展了气象火箭的研制与试验。由于文化大革命中断了 10 年中层大气研究。在 70 年代末期我国科学界在调研国际学术前沿的基础上确定中层大气研究作为我国大气科学和空间科学的一个新的重点,在观测手段和理论研究方面给予足够的重视。20 多年来我国中层大气研究工作已经有了系统的发展。

当前,我国从事中层大气研究的科技人员主要集中于中国科学院大气物理研究所(简称大气物理所),空间科学与技术应用研究中心,武汉物理与数学研究所,兰州高原大气物理研究所,中国气象科学研究院,北京大学大气科学系,云南大学地球科学系,南京大学大气科学系和中国科技大学地球与空间科学系。此外,在平流层天气气候以及日地关系方面还有其他单位参与^[2]。1987~1990 年,中国科学院支持了“太阳第 22 周峰年期日地系统整体行为研究”重大项目,其中中层大气研究作为主要课题之一^[3,4]。1991~1995 年,国家南极考察“八五”重大项目“南极地区日地系统整体行为研究”^[5]和“南极气候研究”两项均有中层大气探测与模式研究课题,国家自然科学基金委员会支持了“中层大气基本过程及其在大气上下层耦合中的作用”重点项目^[6]。有关中层大气的前期综述还可参阅文献 [7~10]。

2 中层大气探测高技术的发展

国际中层大气研究的深入首先依赖于中层大气探测技术的重大进展,这里包括无线电雷达探测技术、激光雷达和光谱探测技术、探空技术和卫星对中层大气遥感技术,其中 VHF Doppler 雷达、中层激光雷达和探空技术是使人们获得中层大气参数与定点上空高时间分辨率和垂直分辨率的最强有力手段,而气球和火箭探空是关键直接探

测手段。同时，卫星遥感是获得全球中层大气状况知识的主要手段。我国的气象与环境卫星至今还未能 在平流层及中层大气遥感中发挥作用，但在地基中层大气遥感与探空方面已经进行了卓有成效的技术发展与观测分析工作，其中大气物理所是主要承担与贡献单位。

2.1 香河 VHF/ST 雷达研制与应用

在 20 世纪 70 年代末，大气物理所有关科学家就认识到基于电磁波与大气湍流运动相互作用所引起的晴空大气散射原理，工作于甚高频（VHF）段的大型 Doppler 雷达是当时国际上新出现的最强有力的中层大气动力特征的探测手段。20 世纪 80 年代中期，在中国科学院支持下开始了独立研制大型相控阵天线和阵列式发射机组合的建于香河观测站的 VHF Doppler 雷达。由于工程大，分二期进行，首期目标是进行平流层/对流层风和湍流的廓线观测，二期为扩展至中间层大气的探测。自 1993 年始，该雷达陆续开展了观测试验。由于该雷达具有多方向同时扫描功能，已获得了多类型的，包括水平风廓线、垂直速度分布、湍流强度、垂直方向表观反射率、大气波动等观测结果，为大气上下层相互作用观测研究提供了强有力的手段^[11]。这是国内第一台独立研制并具有多功能的中层大气研究雷达。表 1 列出了其主要技术和功能指标，这些指标在国际 ST 雷达中属先进行列。图 1 给出了天线阵、地下发射机房一角的照片。图 2 给出了由该雷达所测的大气波动结构^[12]。

表 1 香河 VHF/ST 雷达的性能与功能指标

工作频率：78MHz	可设置起止观测时间，风廓线探测间距 (由 ADC 采样频率决定，最短 150 m)
天线：八木振子相控阵列	起止观测高度：约 1.5 km 最高观测高度：15~20 km
使用面积：2500 m ² ，5000 m ² ，100000 m ² 可选（现用 2500 m ² ）	信息输出方式（脱机、实时、数据、图像） 风速观测范围 0~40 m s ⁻¹
波束宽度：1.98°×8.7°，1.98°×4.1°，1.98°×1.98°可选	数据处理
扫描角度：0°~±20°（正交）	时域平均数：可控（1~255）
发射机：36 部分布式	谱平均数：可控（1~100）
峰值功率：225 kW，450 kW，900 kW	高度分层间隔：可控（1~128）
平均功率（最大）：5.625 kW，1.25 kW，22.5kW	FFT 点数：可控 2N，N=1~10
工作比：最大 2.5%	第一测风高度：1.5 km
脉冲宽度：2 μs，4 μs，10 μs	波束扫描方式：固定方向，脉冲间转换
重复频率 F：2500 Hz，1250 Hz 任选	雷达威力选择：全能力，1/4 能力，1/16 能力

2.2 中层大气探测激光雷达系统研制与应用

中层大气中除了大气状态参数外，十分关键的物理要素是臭氧和气溶胶。激光雷达是对这些要素最强有力的探测手段。在 1967 年由大气物理所和中国科学院上海光学精密机械研究所（简称上海光机所）合作研制成功我国第一台红宝石激光雷达基础上，1980 年，大气物理所研制完成了我国第一台用于平流层气溶胶探测的红宝石激光雷达。利用该雷达先后在北京监测了 1982 年的墨西哥 El Chichon 火山^[13]和 1991 年菲律宾 Pinatobu 火山爆发引起的平流层气溶胶的长期变化^[14]。该雷达自 1993~1999 年期间又投



图 1 香河 VHF/ST 雷达天线阵、地下发射机房一角（左下方）、主控观测楼（右上方的一个二层小楼）
该雷达位于河北香河大气物理所观测站内，其天线阵与地下发射机房已具备作为 MST 雷达的最终规模

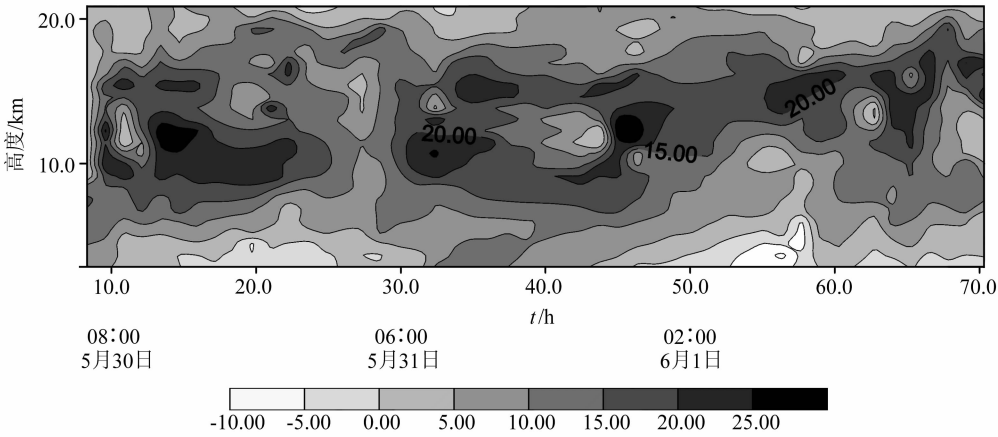


图 2 由香河 VHF/ST 雷达所观测的大气波动时间序列示例（可以看出对流层中部及以上的波动时间序列）

入我国南极中山站（69°S，76°E）进行平流层气溶胶监测。90 年代中期在中国科学院支持下，大气物理所开始研制用于中层大气臭氧探测的大型 4 波长激光雷达系统，至 2001 年初步获得了北京上空平流层臭氧浓度分布。由于该激光雷达系统可同时获得对流层、平流层臭氧浓度分布，可用于研究大气上下层交换的化学与输送问题。与 VHF/ST 雷达配合将十分有利于对流层、平流层交换及其化学、动力学过程的研究。图 3 为其结构示意图^[15]。图 4 给出了 2001 年的一次观测结果（邱金桓，私人通信）。

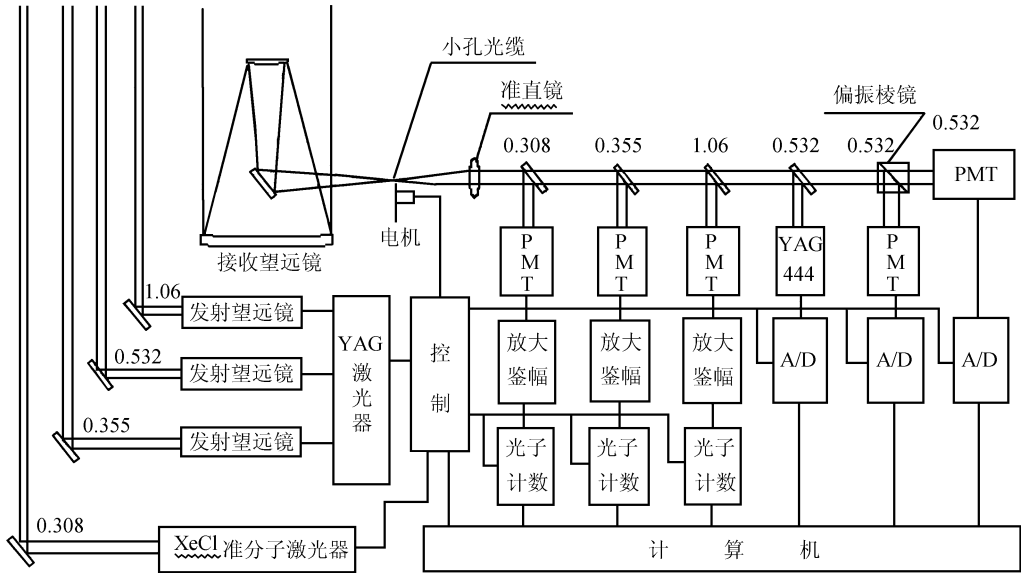


图 3 4 波长激光雷达结构框图

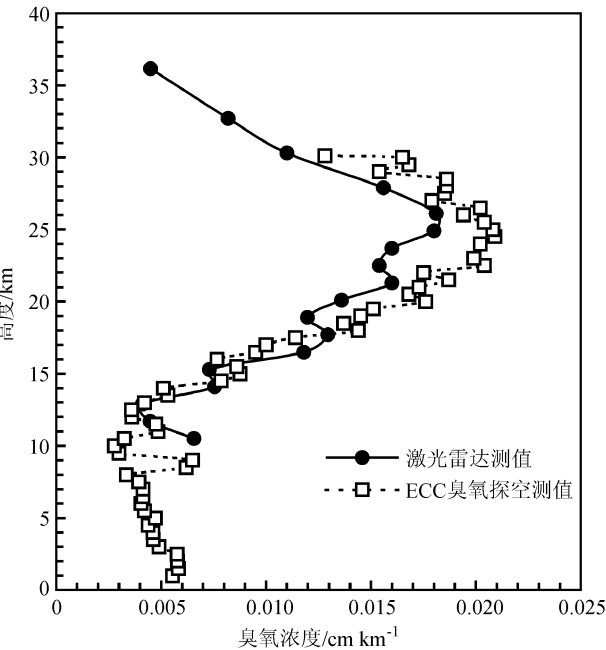


图 4 4 波长激光雷达观测平流层臭氧分布的一个个例

中层激光雷达在我国的其他单位也获得了发展应用，特别是在中国科学院安徽光学精密机械研究所（简称安徽光机所）先后发展了平流层气溶胶和臭氧探测激光雷达，获得了较为系统的资料，提供了在我国中东部上空的信息。中国科学院武汉物理与数学研究所发展了中间层大气温度密度探测的 Rayleigh 散射激光雷达和钠原子激光荧光探测雷达，近几年已取得有价值的结果。最近武汉大学亦建立了类似的系统并取得了有价值的资料。由此，我国已在南北三地具备了中层大气区域性联合探测的条件。

2.3 平流层探空技术的发展

自 1979 年起，中国科学院组织高能物理研究所和大气物理研究所等筹建高空科学气球探测工程，大气物理所作为主要承担单位之一，为该工程承担了场地、测控、回收等工作，与此同时大气物理所也利用高空科学气球工程能力发展了大气气溶胶粒谱垂直分布的探测，先后近 10 年进行了每年 1~2 次气溶胶粒谱分布的探测^[16]。在 863 航天高技术预研项目的支持下，1998 年大气物理所和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所（简称长春光机所）

联合进行了高空气球载太阳/地球大气后向散射紫外光谱仪的探测试验，该项试验仅在美国和欧洲进行过。所得结果验证了该类我国自行研制设备的性能与精度，同时又获得了 34 km 高度上观测的太阳紫外辐照谱和大气后向散射谱，为验证大气臭氧分布反演方法提供了基础（图 5、6）。高空科学气球的进一步应用，将为我们直接了解中层大气成分结构提供重要的基础。目前，大气物理所等正在发展新的球载探测技术。



图 5 1997 年 8 月 24 日进行的球载试验太阳直射/地球大气反射紫外光谱的实验仪器与姿控吊篮外观

为加深对大气臭氧层垂直结构及其变化的认识，大气物理所自 20 世纪 80 年代后期，首先在中国科学院“22 周太阳峰年日地系统整体行为研究”项目支持下开始了大气臭氧探空仪的研制与应用^[17, 18]，随后在国家科学技术委员会和国家南极考察委员会的“南极科学考察”项目支持下对南极地区的春季臭氧洞进行了探测研究，获得了中山站上空“臭氧洞”结构的实测结果^[19]，清晰地表现出南极春季平流层中下部臭氧被损耗的实际图像。在研究试验成功的基础上，大气物理所和中国气象局合作于 2001 年起推进臭氧探空的业务化，在北京中国气象局大气探测试验基地开展了每周 2 次的臭氧探空探测准业务试验，并已取得成功。

2.4 曙暮光偏振探测技术

对于平流层气溶胶和微量成分的探测，曙暮光辐射及其偏振特性的探测是一个重要的信息源。这是一项相对简单且易于长期监测的技术。1990 年，吴北婴等^[20]研制成一台多波段曙暮光天空光度计。采用光子计数技术和全偏振参数测量技术，从 1991 年起对 Pinatobu 火山爆发引发的北京上空火山气溶胶层及其长期时间变化进行了连续 5 年的监测。结合激光雷达观测，反演平流层气溶胶消光系数及其变化。1997 年后，大气物理所新研制的一台太阳/天光光谱仪亦具有曙暮光观测能力，被用于观测研究大气臭氧与 NO_x 的变化^[21]。

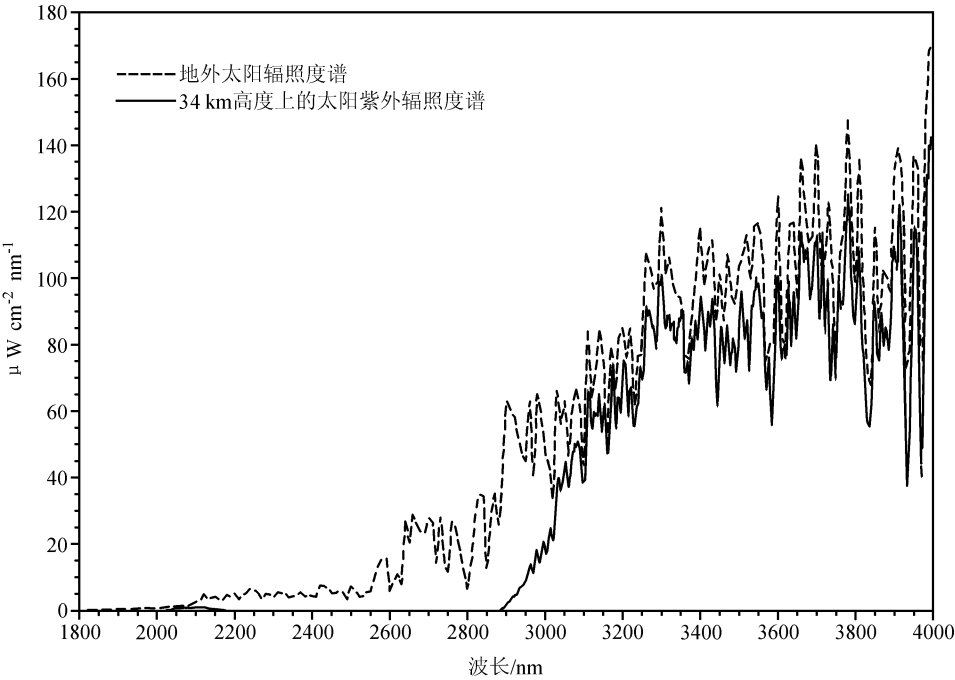


图 6 在 34 km 高空所获得的太阳紫外辐照度谱
(同时给出美国由 UARS 卫星所得为基础的地外太阳辐照度光谱值，可以看出在 UV-A 段二者十分一致，而在更短的紫外波长，34 km 以上的大气层中的 O₃ 等成分仍有明显的吸收)

2.5 地基紫外光谱仪

长春光机所李福田等在 863 计划航天领域支持下开展了空间载紫外光谱仪的研制，作为其中的一步，研制了地基太阳和大气紫外光谱仪。该仪器能分别测定太阳直射与大气散射的紫外辐射光谱，波段 285~450 nm，波长分辨率 0.6 nm，实现全自动控制观测。谱辐射测量绝对精度达±5%~10%；相对精度达±1%~2%；其指标达到了国际同类仪器的水平。自 1992 年起已在长春开始了野外观测^[22, 23]，1994 年在北京开始了连续观测。

3 中层大气特征的探测与分析

3.1 平流层气溶胶、火山云的综合探测与分析

自 20 世纪 80 年代初期开始，我国科学家对平流层气溶胶和火山云进行了持续的综合探测。吴北婴和吕达仁^[24, 25]为解决平流层气溶胶的光学反演，建立了球面分层大气矢量辐射传输 Monte Carlo 模式，用来研究平流层气溶胶分层及不同光学厚度下的散射特性，该模式可用于系统研究各类参数的敏感性，特别是多次散射的影响；作为一个完整的模式，又可用于验证各种近似方法的有效性。吴北婴和吕达仁^[26]还建立了单次散射近似下的平流层气溶胶反演方法。基于上述原理和方法，关虹等^[27]利用曙暮光绝对光强观测值反演平流层气溶胶分布也获得了成功。基于上述方法，可利用历史上的曙暮光观测资料重建平流层气溶胶的长期变化。

孙金辉等^[13, 14]用大气物理所平流层激光雷达对平流层气溶胶的长期监测获得了北京上空平流层气溶胶长期变化的资料,在 1982 年 El Chichon 火山爆发和 1991 年 Pinatubo 强火山爆发后的火山云变化均获得了垂直结构的时间变化。观测结果表明,由于各高度不同环流特征的输运作用,北京上空的火山云呈现很强的高度变化与随时间的起伏,最大的气溶胶后向散射比达到 35,出现于 1991 年 10 月 16 日的 23 km 高度,而最强的平流层火山云总光学厚度则出现于 1992 年春。安徽光机所周军等^[28]亦对 Pinatubo 火山云进行了连续激光雷达监测。

自 1991 年研制成曙暮光光度计后,即对北京上空的 Pinatubo 火山云开展了曙暮光期间绝对光强和偏振度的监测。吴北婴和吕达仁^[29]利用天光偏振观测和激光雷达测量结果反演了 Pinatubo 火山期间火山云消光系数的垂直分布,定量地给出火山气溶胶的光学特性,结果表明在近一年时间内其光学厚度超过 0.1,从而可能造成到达地表的太阳短波辐射的严重减小。分析的另一个重要结果是发现在 8~11 km 高度存在光学厚度达 0.01 的薄气溶胶层,该层的存在不但改变该层所起的辐射收支作用,更主要的有可能导致高卷云的增加,从而引起火山云进一步的气候效应。对于火山云粒子谱特征的探测,吕达仁等^[30]利用长春净月潭遥感试验场的太阳光谱观测,分析整层大气气溶胶平均光学厚度 1990 年与 1991 年下半年的差值谱反演获得火山气溶胶的平均粒谱分布,结果表明火山云在此期间在长春上空的光学厚度亦约 0.1,平均火山云粒谱满足对数正态分布,谱峰在 0.3~0.4 μm 。与地面观测分析相配合,陈洪滨等^[31]利用美国卫星 SAGE 资料分析了我国南北地区上空在 Pinatubo 火山爆发前后的平流层气溶胶光学厚度与垂直分布变化,与地基观测结果十分相符。由此,比较完整地给出了 Pinatubo 火山引发的平流层气溶胶变化特征。

对于火山气溶胶的辐射影响,汪宏七和赵高祥^[32]用二流近似计算了强火山爆发后出现的极强火山云的短波辐射通量,行星反照率和大气加热率的可能影响,该文讨论了一些极端情况,对估计火山云辐射效应有一定参考作用。吴北婴等^[33]利用火山云实际观测资料和 δ -4 流辐射传输模式计算了火山云引起的地表、对流层和平流层辐射收支变化。结果表明,Pinatubo 火山云对中纬地区而言,使进入对流层顶的短波辐射减少 7~9 W m^{-2} ,长波辐射增加 2 W m^{-2} ,在平流层下部造成的日加热率达 0.35 $^{\circ}\text{C}$,可与该区 9.6 μm 臭氧吸收带作用相当。

为了解南极极区平流层云(PSC)和平流层气溶胶,大气物理所自 1993 年初在南极中山站安装了平流层气溶胶激光雷达进行观测,孙金辉等^[34]初步分析了 1993 年的观测结果,了解南极地区平流层气溶胶的变化。赵永净等^[35]利用南极站臭氧和探空资料分析了平流层硝酸—三水合物凝结温度与臭氧变化的关系,表明了极区平流层气溶胶形成对臭氧减少的重要作用。

为考察空间激光雷达定量遥感大气气溶胶光学特性的能力,邱金桓和吕达仁^[36, 37]分析了空间长距离遥感中的多次散射效应,并提出了克服多次散射效应的反演方法。

3.2 大气臭氧与微量气体的观测与分析

大气物理所主持的两台 Dobson 臭氧光度计观测(北京和昆明,其中昆明的观测工作由云南大学进行),自 1980 年起参加世界臭氧监视网,提供常规的臭氧总量的可靠资料。20 世纪 90 年代初以来,中国气象科学研究院在青海瓦里关山大气本底站、黑龙

江省龙凤山站和南极中山站先后布设了 Brewer 谱光度计, 提供这些地点的臭氧总量变化资料。

大气物理所开展了臭氧探空测量。在北京地区分别使用高空科学气球载紫外吸收型臭氧浓度仪和电化学型探空仪进行了探测, 1993 年起在南极中山站开展了臭氧探空测量。孔琴心等^[17, 18]和王庚辰等^[19]初步分析了这两地的探测结果, 在 20~25 km 范围内的主峰外, 一般 10 km 左右存在次极大, 还观测到了中山站南极春季的臭氧急剧减少。

对我国上空区域性臭氧分布的变化, 一个极其重要的结果是周秀骥等^[38, 39]利用美国 TOMS 全球臭氧总量分布资料, 于 1994 年首先发现在青藏高原上空夏季出现明显的臭氧总量低值区, 或称为臭氧低谷区。该谷区形状与青藏高原十分相似, 每年 6 月逐渐形成, 9 月逐渐消失, 其值较同纬度平均值低约 10%。这一现象的成因及其区域环境和气候效应显然是一个重要的研究方向。

陈洪滨等^[40]利用美国卫星 SAGE II 料分析了 1984~1992 年我国南 (20~30°N)、中 (30~40°N)、北 (40~50°N) 三个纬度带臭氧的总量与垂直分布, 清楚地揭示出南北不同的平均季节变化与垂直分布特征变化。其中南北季节变化的反位相, 即南部夏高冬低, 北部相反。同时北部臭氧垂直分布峰值高度冬季平均下移 3~4 km 的事实也揭示出冬季对流层环流/行星波的活跃以及相应的平流层行星波—基流相互作用所引起的臭氧从热带向高纬的运输。

对于大气臭氧总量的长期变化与区域特征, 王连英和黄荣辉^[41]对 1960 年~1985 年各月北半球大气臭氧总量进行了谱分析, 得到了北半球中纬度臭氧总量各波数振幅与 QBO 和 El Niño 的相关性。魏鼎文等^[42]对该段资料编了北半球大气臭氧总量时空变化图集。王卫国等^[43]分析了昆明地区臭氧变化与对流层顶关系以及臭氧层对夏季赤道东太平洋海温异常激发的大气环流型的遥相应, 北半球 100 hPa 位势高度场异常对臭氧层遥相关结构的影响。

卞建春等^[44]最近利用 1979~2001 年较长时段昆明、北京的 Dobson 资料和同期卫星 TOMS 资料进行分析, 在验证二种数据有高度相关性的基础上, 主要用 Dobson 资料获得了二地长期变化趋势的主要模态与定量特征。结果表明北京和昆明臭氧总量的长期变化趋势分别为 -0.642 DU a^{-1} 和 -0.009 DU a^{-1} (DU 为度量臭氧柱含量的 Dobson 单位, $1 \text{ DU} = 10^{-3} \text{ cm STP}$), 这个数值较此前一些作者^[45]用较短时间序列所得结果的绝对值为小, 因而提出对于短时间序列所得变化趋势与人类活动直接影响之间的关系尚需慎重对待, 而对自然过程需要有更多的了解。统计还揭示, 大气臭氧有很强的年际变化趋势, 但这种变化主要由 QBO 和长期趋势两种信号组成。此外, 除了明显的季节变化外, 二地特别在冬季有强烈的季节内震荡, 其强度与季节变化相当。

3.3 大气紫外辐射观测分析与紫外气候学研究

臭氧层变薄的直接后果之一就是到达地表的 UV-B (280~320 nm) 辐射增加, 从而引起生态系统的有害后果和人类健康的受损, 因此大气紫外 (UV) 特别是 UV-B 段辐射的观测分析也成为当前中层大气相关研究的热点之一。由于地表 UV 辐射不仅受臭氧吸收的作用, 还受气溶胶和云的散射控制, 因而一方面需要紫外光辐射的长期绝对值的监测, 另一方面也需要对控制因子进行了过程和模式研究。对于后者最需要的

是紫外高分辨率光谱辐射与相应的大气要素测量。

大气物理所自 1990 年起在北京地区和南极中山站进行了紫外辐射观测, 获得了这两个地区紫外段 (以及 UV-B 段) 总辐射季节和年际变化的资料。对于南极地区 UV-B 的气候学研究, 吕达仁和李卫^[46]进行了评述。白建辉和王庚辰^[47~51]对北京地区太阳紫外总辐射的观测资料进行了分析, 给出了基本数值特征, 他们对晴天紫外总辐射与太阳总辐射比值的控制因子的分析表明, 比值受太阳天顶角、大气水汽和臭氧的控制, 而其平均比值与太阳高度角的相关性最高, 比值冬高夏低, 即紫外辐射年振幅小于太阳总辐射角的年振幅, 他们提出了相应的统计计算方法。利用北京地区气象资料和臭氧观测资料, 给出了近 11 年来北京地区地面紫外总辐射的变化趋势和近 20 年来晴天紫外辐射变化趋势, 结果表明, 其值缓慢减少, 并有振荡。同期大气臭氧和水汽的变化也呈现振荡而略由增加的趋势, 其间的关系尚不清楚。熊效振和王庚辰^[52]利用 δ -Eddington 近似辐射传输计算, 引入局地地面气压、臭氧和地表反照率的时空变化, 计算了中国地区冬季 (1 月) 和夏季 (7 月) 晴天地面太阳紫外 (290~400 nm) 和 UV-B (290~325 nm) 辐射分布。并计算了臭氧总量减少 5%~15% 时 UV-B 变化。结果表明, 中国北部地区 UV-B 增加 1%, 夏季增加 0.6%~0.7%。

自 1992 年起, 在长春和北京先后开展了高分辨率太阳紫外光谱辐射观测, 利用前面介绍的地面太阳紫外光谱辐射仪系统观测了不同季节不同天气条件下的地面紫外光谱辐射。吕达仁等^[22, 23, 53]对初步观测资料进行了总结, 提出了长春地区 UV, UV-B 辐射的统计特征, 在晴朗情况下与太阳天顶角的回归关系, 还分析了典型的两种比值谱, 即散射光谱与总辐射光谱的比值谱以及一日内不同时刻光谱与当日中午极大光谱之间的比值谱, 它们各自显示出一定的普遍特征, 为下一步的数值模式研究提供了基础。由于已有的紫外波段的辐射传输模式均可能有较大的误差, 这样的定量观测与分析结果是十分必要的。对长春和北京的典型观测结果结合生物作用谱, 分析了实际观测谱对人体皮肤红斑、植物、DNA 等引起的不同作用剂量, 说明只用 UV-B 表测量有相当的局限性, 而开展紫外光谱监测是十分必要的。

1993 年期间, 周秀骥等^[54]在南极中山站的 Brewer 仪进行了大气臭氧总量和 UV-B 谱观测, 得到了期间中山站上空臭氧总量强起伏的观测结果, 这种起伏与 70~50 hPa 高度上的温度值密切相关。同时的臭氧总量和 UV-B 值观测表明臭氧洞期间臭氧值降低是该期间 UV-B 值增强的主要因子。

利用卫星紫外波段的观测来推算地表紫外辐射是一项十分重要的利于全球和区域性监测的重要研究, 王普才等^[55]根据简化的辐射传输模式和大量的卫星—地面对照测量资料, 建立了简单而又有一定精度的经验公式, 这一公式得到了与加拿大多个地点地面观测相符的结果。

3.4 中层大气的波动和湍流特征观测分析

在 1981 年, 吕达仁等^[56, 57]就利用美国 Plattville MST 雷达进行了夏季强对流激发的中低层大气重力波特征观测和分析, 获得了雷暴等强对流激发的波动谱与垂直结构, 揭示了对流层顶上下的差别, 这一结果被此后的不少重力波研究者引用和证实。吕达仁和李卫^[58]利用我国高空科学气球长距离平飞的观测结果, 对平流层中部 (28~36 km) 的风场的频谱特征进行了分析, 发现在波周期 3 h~15 min 范围内, 对波数谱斜

率为 $-5/3$, 离散度不大, 在短于 15 min 波谱则明显不同, 谱斜率呈正值。对空间谱而言, 在波长 >8 km 的范围内, 对数谱斜率平均高于 $-5/3$, 波长短于 8 km 的波则呈现随波数弱增加趋势。易帆等^[59, 60]利用德国 SOUSY VHF 雷达的观测资料分析了中纬夏季中间层顶的重力波临界层现象, 表明该高度范围的重力波水平相速与该层风速相同, 从而形成非线性重力波, 在临界层产生强湍流。同样, 利用移动式 SOUSY VHF 雷达观测资料分析了极区夏季中间层顶的重力波临界层, 并提出了这类现象可用内重力波的参量不稳定机制加以解释。张绍东等^[61]对上述同一雷达资料分析发现极区中间层高度上除了大量的上行重力波外, 还存在下行重力波(等相面上移), 速度约 $15\sim 40\text{ m s}^{-1}$ 范围内。马瑞平^[62]分析了 SOUSY VHF 雷达的探测资料, 给出了中间层大气水平和垂直风场的高度剖面, 证实在中间层大气中不仅存在重力波, 也存在惯性重力波, 重力波的水平相速和背景风的传播方向不同, 证实了波传播的存在, 指出重力波的波源在极区。磁暴加热对大气动力过程的影响很少。

在 MST 雷达的处理方法研究方面, 李卫和吕达仁^[63]提出用最大熵(MEM)方法来提取风场特征, 与用 FFT 方法相比, 显示出 MEM 的优点。

4 中层大气行星波传输波流相互作用及其对 O_3 经向输运作用的理论与数值模拟研究

4.1 中层大气行星波传播与波流相互作用

平流层大气环流中大尺度行星波占有十分重要的地位。它不但是环流的基本表征, 其传输对于物质场特别是臭氧的经向输运起着重要的作用。从 1980 年代起, 黄荣辉及其研究组对行星波的垂直传输及其对臭氧的输运作用进行了比较系统的研究^[64]。黄荣辉等^[65, 66]和严邦良等^[67]用线性化全球原始方程谱模式研究地形强迫行星波垂直传播特征, 表明行星波的能量沿两支波导进行传播, 在波从对流层向平流层传播中极地波导起主要作用。由于重力破碎的阻尼作用, 地形强迫的行星波无论其波作用量或振幅均呈振荡状态。陈文和黄荣辉^[68]利用变换欧拉平均方程讨论了行星波动力学。观测和模拟结果都表明, 在北半球冬季准定常行星波的经向传播存在两支波导, 即一支为高纬度波导, 另一支为低纬度波导。通过对 EP 通量的进一步研究表明, 平流层爆发性增温是沿高纬度波导传播的异常行星波与平均流相互作用的结果。另一方面, 热带风场的 QBO 是低纬平流层下层大气纬向平均流的重要年际变化, 这一变化会影响行星波沿低纬度波导的传播, 还通过波一流耦合而调制行星波沿高纬度波导的传播。

4.2 行星波对臭氧经向分布的使用

由于行星波传播的变化影响大气臭氧的输送与相应的经向分布, 陈文和黄荣辉^[68~72]从拉格朗日平均环流观点讨论了行星波对大气中 O_3 的输运作用。他们根据理论分析表明, 定常保守行星波对大气 O_3 没有输运作用。而非定常的行星波对大气中 O_3 有明显的输运作用, 它可以强迫出一个正的输运环流, 即从热带上升而从高纬下沉的环流。而只有当耗散的行星波传播到平流层时就会在平流层强迫产生输运环流, 他们利用一组波一流相互耦合球坐标原始方程谱模式计算了地球大气中行星波对 O_3 时空变化的作用。模式计算结果表明, 行星波传播和相应的对 O_3 输运的作用有明显的季节变化

与年际变化。在定常流情况，在北半球冬季由于行星波上传到平流层而大大增强了中高纬地区向极地向下的 O_3 输运。而具有年际变化特征的热带纬向风 QBO 不仅通过影响东、西风切变而引起热带 O_3 的年际变化，而且通过影响行星波传播而引起行星波对 O_3 输运的年际变化。结果是 QBO 处东风位相时，中高纬地区行星波对 O_3 的输运比西风位相时强。模式计算还表明，非定常流情况下行星波对 O_3 输运的作用与定常流情况是类似的，但在波一流相互作用情况下，中高纬地区行星波对 O_3 输运的年际变化大大增强。上述理论分析与数值模拟结果与一系列根据实测资料的分析结果十分接近^[41, 44]。

4.3 行星波的跨赤道传播

马瑞平等^[73]利用和改进了一个时变中层大气原始方程半谱模式，模拟 10~90 km 高度范围格距 5 km，纬度范围 $\pm 90^\circ$ （格距 5° ），纬向进行谱展开，分解为纬向平均方程和波数为 S 的波动方程，两组方程交替积分，以模拟波流相互作用。以此数值模式研究了中层大气行星波的基本状态和传输特征和关于 QBO 对行星波传播的影响，结果表明，波数 1 行星波在 QBO 东风相时比西风相时更易向上传播，平流层增温更快更强。用该模式还模拟了中层大气行星波的跨赤道传播，结果表明纯粹的定常行星波不能跨越赤道上空的零风带而从冬半球传播到夏半球，与经典定常行星波传播理论相符。而客观上存在的中层大气行星波从冬半球向夏半球的传播可以由三个因素而得以实现，即赤道上空中间层风场存在半年周期振荡，该区出现西风时即可实现跨赤道传播；定常行星波幅度的周期起伏可以造成跨赤道传播。在中间层激发起瞬变行星波，其夏半球幅度越过冬半球，起伏周期越短，传播越明显，事实上对流层的行星波至多具有定常特征，因而上述形成跨赤道传播的基础是存在的。

5 太阳活动对中层大气影响与大气上下层耦合的分析研究

5.1 太阳活动对中层大气臭氧的作用

控制臭氧总量变化的因素，包括人为因素（如 CFC 释放）、地球因素（如火山爆发）、大气环流因素（输运与反应条件）以及太阳活动（紫外辐射、粒子流等）等多方面的因素。谢应齐等^[74]和郭世昌等^[75]分别讨论了昆明大气臭氧层 1990 年~1993 年的持续减少与太阳活动强度持续减弱的相关性和 1980 年~1990 年昆明大气臭氧层变化与太阳活动的相关性。

5.2 太阳活动与对流层天气气候关系中的中层电过程作用

言穆弘和张义军^[76]分析了太阳活动和雷暴活动的实测资料，发现太阳耀斑与雷暴活动的正相关，并提出太阳活动调制全球电路，改变中层大气电导率和云顶高度上的晴天电场强度。初步的数值模拟计算表明，雷暴中的电能积累有可能增强其中的动力过程，促进对流活动的进一步发展。

5.3 太阳活动、QBO 和中低层大气环流与天气气候关系的探讨

自 Labitake 和 Van Loon 提出太阳活动和 QBO 对大气环流的联合作用分析事实以来，我国科学家亦在以往工作的基础上开展了研究。吕达仁等^[77]对此作了评述。瞿章等（私人通信）讨论了 QBO、太阳活动与东亚天气气候，特别是中国梅雨的相关性。分析发现赤道地区 1953 年~1991 年期间 70~10 hPa 的风场存在着明显的近于 28 月的

谱峰。对长江中下游 1895~1991 年共 107 年逐年梅雨总量和持续降水日分别的谱分析表明在 2.33 (~28 月) 和 11.89 年附近分别有最大和次极大峰值, 而且各太阳活动周期内梅雨总降水量和降水类型与该太阳黑子数峰值有一定相关性, 这里表明梅雨期降水与 QBO 和太阳活动均有一定关系, 由于控制过程的复杂性, 其间联系的物理过程尚不清楚。

6 中层大气重力波的理论 and 光化数值模拟

6.1 重力波和惯性重力波的传播

在线性理论的框架下, 张辉军和吕达仁^[78, 79]定量讨论了重力波和惯性重力波在风切变背景场中的传输特征, 推导了相应的传输方程。数值结果表明, 在强风切变下, 由于 Doppler 效应对波谱在上传过程中产生了显著的滤波效应。从而使波谱产生明显变化和相对于平均流的不对称传播效应。三维各向同性的重力波向上传播时一部分波位能转变为动能, 而一部分垂直动能进一步变为水平动能, 从而改变了波的各向同性。对惯性重力波而言, 在未遇临界层吸收前谱结构变化不大, 而在临界附近会引起方向性滤波效应。

对于中间层大气中的重力波传播, 还应考虑非线性相互作用与损耗过程。在这方面, 我国学者也进行了系列的理论研究。例如, 易帆和李钧^[80]由可压缩流体力学方程组出发, 采用局域近似理论建立了剪切流动中扰动的发展方程与声重波频散关系, 发现剪切不稳定性倾向于激发短周期波动, 易帆等^[81]在弱非线性相互作用近似下推导出损耗大气中重力波的非线性相互作用方程。易帆和肖佐^[82]在随机相位近似下推导了损耗大气中重力波场的非线性传播方程, 该方程可构成中高层大气重力波能量收支平衡的出发点。易帆和肖佐^[83]进一步在同样的弱相互作用的约束下建立了损耗大气中惯性重力波的非线性相互作用方程。比起前人的方程来, 该方程中包括了波的空间传播、粘滞产生的衰减和连续谱情况, 粘滞衰减率的大小与波的空间尺度以及传播方向有关。引入科里奥利力后使相互作用成为复量, 利用这组方程考虑惯性重力波的参数激发。在共振条件满足时主波存在一个导致次级波指数增加的阈值, 其大小与次级波的损耗率成正比。熊建刚等^[84]根据同样的思想研究了耗散对 Rossby 波非线性演变的影响。他们采用一种新的模分离技术, 建立了 Rossby 波与惯性重力波这两种不同波模之间的相互作用。他们研究了三个 Rossby 波包之间的非共振相互作用, 表明在有耗散时三个波包的能量都会衰减。在外源、耗散和非线性共同作用下, 受外源作用的波包包数相互关系的不同, 其相互作用会呈现分岔等十分不同的情况, 因此可以理解平流层爆发性增温 (SSW)。他们的数值计算还表明, 低纬地区的混合 Rossby 重力波和 Rossby 波、重力波之间有明显的能量交换, 这些波动向中高纬传播时将能量传送给高纬大中尺度的波动, 再向中小尺度运动传输。

6.2 中层大气重力波源研究

一般认为中层大气重力波之源在对流层, 包括地形、天气系统、强对流等, 总体而言对这些源的详细机制和定量研究尚缺乏。对强对流而言, 当前更多关注热带穿透对流的作用。对于中纬夏季强对流在激发上传至平流层及以上的重力波的作用陈泽宇

和吕达仁等^[85]对此利用一个非静力可压缩对流动力学模式与一个云模式相耦合，以一次中纬雹暴实际观测为个例进行了三维穿透对流激发起平流层上传重力波的数值模拟，清晰地展现了穿透对流在对流层顶产生扰动时呈现的波含能子区、波激发子区和满足重力波偏振方程关系的波形成子区的清晰特征。模拟表明重力波引起的动量通量在对流层顶高度上达 0.3 N m^{-2} ，与冬季大地形激发值相当。这一研究表明中纬东亚夏季强对流作为重力波源是不可低估的。

除重力波的对流层源外，根据对平流层爆发性增温（SSW）期平流层环流的分析，黄荣辉和陈金中^[86]发现由于准定常行星波上传，在平流层存在着强烈的非地转运动，由此可能产生强辐散场和大振幅重力波。他们以一个线性正压球谱模式来模拟这种平流层内的重力波激发机制。以 1979 年 2 月的一次 SSW 过程气象场为例，他们成功地模拟出平流层内重力波的激发，表明平流层地转适应过程也会是一种重力波激发机制。

7 平流层—对流层交换的物理和化学

大气上下层相互作用对气候和环境的影响是通过多种过程实现的，其中发生于对流层顶上下平流层—对流层交换过程（STE），即物质（空气质量和其中的各种微量气体）和能量动量交换起着关键的作用。平流层—对流层交换通过多种不同尺度和多种不同类型的过程实现，从最大的全球/半球尺度的 Brewer-Dobson 环流到行星波、天气尺度、切断低压、强穿透对流、高空急流强切变不稳定形成的湍流混合等。自然和人类活动产生于地表与对流层大气的微量成分通过对流层顶送入平流层，影响平流层臭氧的重大变化并进而影响对流层顶的辐射强迫。平流层向对流层的臭氧输入亦影响对流层臭氧的收支。所有这些过程的定量研究与各种过程的耦合正是当前的热点。SPARC 计划对这方面研究特别加以强调。杨健和吕达仁^[87]对这方面作了评述。

7.1 全球对流层顶特征变化及对臭氧分布的影响

李国辉等^{1, 2)}基于 40 年（1958~1997）NCEP 全球资料分析了全球对流层顶高度的特征和长期变化趋势，发现由于热带对流和热带外波强迫的共同作用，结合辐射场分布，对流层顶高度的季节变化特征不仅是简单的夏高冬低。在北半球高纬区，对流层顶高显示出双峰双谷型，而在南半球高纬，冬季对流层顶高于夏季。就长期变化趋势而言，发现在 1979 年前后的两个阶段，即 1958~1978 和 1979~1997 二个时段的长期趋势有明显的差异。显然，这与气候突变是相关联的。

7.2 平流层—对流层质量交换的诊断研究

丛春华等^[88]利用 1978~1996 年 NCEP 资料和 1988~1993 年 SAGE 资料计算了青藏高原附近地区平流层和对流层 100 hPa 高度上臭氧和气溶胶的质量交换。结果表明在夏季在以孟加拉湾北部和西藏东南部为中心其输送占主导地位。19 年平均值表明在夏季该地区有 $14.84 \times 10.18 \text{ kg}$ 的向上净输送。而由于该地区有低层气溶胶污染，有可能在向上输送中通过化学反应形成对臭氧减少的贡献。

1) 李国辉、吕达仁、铁学熙，全球对流层顶的时空变化特征，气候与环境研究，2003（已接受）。
2) 李国辉、吕达仁、铁学熙，对流层顶变化 LS/Ut 区域臭氧分布的影响，气象学报，2003（已接受）。

杨健和吕达仁¹⁾用 2000 年 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，一日四次的 NCEP 资料，采用 P 坐标下的 Wei 公式诊断北半球平流层、对流层质量交换的季节变化。主要结论为 (1) 热带地区的空气质量由对流层向平流层输送四季均可出现，其中秋季的通量最大，秋冬季主要在太平洋西部，春夏季太平洋西部向上输送的区域西移并延伸到印度洋。中高纬度地区同时存在向上、向下的通量，并且向上与向下的通量交错出现。在大尺度涡旋附近伴随着平流层向对流层的输送，一年中冬、春季平流层向下的输送强，夏、秋季较弱。(2) 东亚地区除夏季外其他三季都存在很强的平流层向下的输送通量，且其中心位置移动不大。 $(30 \sim 60^{\circ} \text{N}, 100 \sim 150^{\circ} \text{E})$ 区域其净交换为 $-1.7 \times 10^{17} \text{ kg}$ ，占北半球的 29%，而该区域的面积只占北半球的 5.6%，这说明东亚地区的 STE 对北半球平流层、对流层交换研究的重要性。(3) 热带地区向上的输送存在明显的季节变化，由对流层向上输送的区域从冬季到春季逐渐向北移动，然后从夏到冬逐渐向南移动。中纬度地区平流层向下的输送主要集中在 $30 \sim 50^{\circ} \text{N}$ 之间，从冬季到夏季向下输送的高值中心由南向北移动，9 月份高值中心移动到 50°N ，随后从秋季到冬季逐渐南移到 35°N 。其中冬季平流层向下的输送通量最强，达 $-7 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

7.3 STE 的中尺度模拟研究

在中纬 STE 过程中，切断低压是一类重要的天气过程。在这一过程中对流层顶产生复杂的作用和变化，形成一个复杂的作用平流层与对流层三维交换区域。平流输送、垂直运动与对流层顶自身变化均对输送有贡献。

杨健和吕达仁²⁾用中尺度模式 MM5 模拟 2000 年 4 月 8 日~12 日东亚地区切断低压引起的平流层、对流层交换过程，用 Wei 公式计算了此次过程引起的平流层、对流层交换量，并用日本天气图统计了 1999 年和 2000 年东亚地区的切断低压。结果表明，地面锋与高空锋的相互作用，在急流入口处和高空锋区出现对流层顶折叠，并引起平流层、对流层的物质交换，其中对流层顶空气的水平运动起着主要作用。此次过程的净交换量为 $-5.0 \times 10^{14} \text{ kg}$ ，向上的总量与向下的总量之比为 0.93，平均交换通量为 $-0.72 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}$ 。通量的计算对对流层顶的选择很敏感，随着 PV 值减少，向上、向下交换总量、净交换量及交换通量增加。对流层顶不应选择一个简单的物质面，而应表现为一个过渡区，PV 在 $2.5 \sim 3.5 \text{ PVU}$ 之间都可以作为在本个例的对流层顶。对东亚 2000 年气象资料统计结果显示，冬季切断低压出现的频率最低，夏季出现的频率最高，春秋两季居中。东亚地区年平均的切断低压为 60 个，占北半球极区类型切断低压的 52%，由此，我们推断东亚地区的 STE 对整个北半球的 STE 贡献很大。东亚地区的切断低压主要是短寿命的，77% 的切断低压维持时间小于 3 天，切断低压的直径覆盖范围很宽，47% 的切断低压直径在 $600 \sim 1000 \text{ km}$ ，维持时间在 3 天以下的切断低压大多数直径在 1000 km 以下，长寿命（大于 7 天）的切断低压其直径一般在 $600 \sim 1500 \text{ km}$ 。

1) 杨健、吕达仁，2000 年北半球平流层—对流层质量变换的季节变化，大气科学，2003（待发表）。

2) 杨健、吕达仁，东亚地区切断低压引起的平流层—对流层交换数值模拟研究，大气科学，2003（待发表）。

7.4 光化学过程研究与数值模拟

王卫国等^[89]利用 Ling 和 London 的一维热动力、辐射光化学模式，结合低纬昆明地区用逆转法测量的 O₃ 垂直分布资料和由带通滤波得到的平流层纬向风的 QBO 资料，得出了昆明地区局地平流层 O₃ 的 QBO 垂直分布状况。

杨培才等^[90]利用 TOMS 全球臭氧分布资料，对赤道和南北 30°、60° 不同纬度区共 15 个地点的臭氧时间序列进行了臭氧吸引子的数值分析，发现真实的臭氧系统是一个低维系统，维数在 3~7 之间。研究还发现赤道地区臭氧的维数较中纬度低，表明后者的系统更复杂。而中纬区各地所得臭氧系统维数很一致，表明其间似乎存在统一的动力系统。

杨培才等^[91]评述了中层大气光化学平衡态及突变现象，特别是最基本的光化学系统—BOX 系统的非线性特征研究，指出该系统以基本化学反应为基础过程，以汇源等效表征输运和扩散过程，并以控制参数表征自然和人为的作用。所得系统在状态空间中又是耗散的二次型，系统本质上是非自治和刚性的，但可简化为自治系统来处理。他推导了多平衡态的求解消元方法，为进一步讨论一维和多维空间中的多平衡态建立了基础。

对流层顶变化显然会通过动力和化学过程影响臭氧分布，李国辉等¹⁾利用一个二维（高度—纬度）化学模式模拟对流层顶变化引起的臭氧变化，结果表明平均对流层顶季节变化会引起对流层顶区臭氧 10% 变化，并同时会影响其他微量成分的分布，包括长寿命成分 HCl、HNO₃、NO_x 等以及短寿命成分 N₂O 和 NO 等。

为深入了解 STE 交换中化学过程的作用，必须在模式中兼顾对流层化学和平流层化学，杨健和吕达仁（私人通信）将对流层化学输送模式 RADM 进行改造，加入平流层化学模块。然后用 MM5 单向耦合改造后的化学模式 MRADM，研究切断低压引起的对流层顶折叠对上对流层、下平流层臭氧分布形式的影响。结果表明：（1）随着高空槽的发展与切断，高空槽的底部及低压四周臭氧有显著增加，对流层顶折叠使高空臭氧向下输送，这种向下的输送可以到 700 hPa。（2）模拟的臭氧廓线可出现双峰结构。对流层顶折叠对上对流层中的臭氧影响最大，250 hPa 处的臭氧分压增加近 5 倍。结果表明，臭氧的多峰结构是由于切断低压引起对流层顶折叠所造成的。该化学模式还需要进一步完善，并实行双向耦合。

8 结束语

中层大气研究在今后相当长时间内仍将是地气系统和日地系统共同关注的热点。除了 WCRP/SPARC 计划以及 WMO 有关大气臭氧和紫外辐射的监测计划外，SCOSTEP 已将其 2004~2008 年的中心科学计划命名为“太阳—地球系统的气候和天气”（Climate And Weather of the Sun—Earth System, CAWSES）。该计划的 4 个主题中有 2 个与中层大气密切相关，即：（1）太阳对气候的影响；（2）大气耦合过程。在

1) 李国辉、吕达仁、铁学熙，对流层顶变化 LS/Ut 区域臭氧分布的影响，气象学报，2003（已接受）。

国内国家自然科学基金委员会与中国科学院知识创新工程分别将中层大气研究列入重点支持内容。同时由于航空、航天对了解该层大气环境的迫切需求,上述几个方面的研究将继续深入。东亚地区中层大气过程及其与全球气候环境变化的关注将是我们优先注意的重点内容。

本文只是对近年来中国科学院大气物理研究所及国内相关单位平流层与中层大气研究作了一个比较简单的回顾,由于时间与资料的局限,疏漏与错误之处尚请有关作者见谅。

参 考 文 献

- 1 周秀骥、吕达仁、周明煜,中国大气物理学大发展与赵九章,叶笃正主编,赵九章纪念文集,北京:科学出版社 1997, 87~92.
- 2 Lu Daren, MAP-oriented research in The People's Republic of China, Intl. MAP Symposium Nov. 26-30, 1984, Kyoto, Japan (文集), 1984.
- 3 Hu Wenrui, Zhang Borong, and Lu Daren, The Program of Global Character Research of Solar-Terrestrial System in 22nd Solar Cycle in China: An Overview, *Adv. Space Res.*, 1991, **11** (5), 95~106.
- 4 Hu Wenrui, Zhang Borong, and Lu Daren (ed.), *Advances in Solar-Terrestrial Science of China* 1992, Science Press, Beijing, 1992, 311~320.
- 5 Liu Ruiyuan, and Lu Daren, Geo-space Environment Monitoring at Zhongshan Station, Antarctica. Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Spec. Issue, 52, 1998, 13~27.
- 6 吕达仁、王英鉴,中国中层大气研究的近期进展,地球物理学报,1994, **37** (增刊), 74~84.
- 7 吕达仁,中层大气与全球变化,科技导报,1996.
- 8 吕达仁,中层大气与大气探测,走向二十一世纪的中国地球科学,郑州:河南科学技术出版社,1996.
- 9 Lu Daren, and Wang Yingjian, Recent advances in middle atmosphere research in China in "SPACE SCIENCE IN CHINA", Edit. By W-R HU., Gordon and Breach Science Publisher, 1997, 183~206.
- 10 Lu Daren, Yi Fan, and Xu Jiyao, Advances on Study of Middle and Upper atmosphere and Their Coupling with Lower Atmosphere, *Chinese J. Space Science*, 2002, **22**, 111~119.
- 11 Li Wei, and Lu Daren, Preliminary Results of Atmospheric Turbulence Observation with Xianghe MST/ST RADAR, *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, **12** (4), 394~399.
- 12 李卫、吕达仁,香河 MST 雷达大气湍流探测初步结果“地球环境和气候变化探测与过程研究”,吕达仁主编,北京:气象出版社,1997, 51~56.
- 13 孙金辉、邱金恒、夏其林等,激光探测平流层气溶胶层后向散射系数分布,大气科学,1986, **10** (4), 431~436.
- 14 孙金辉、邱金恒、夏其林等,激光探测平流层火山云,科学通报,1993, **38** (7), 631~633.
- 15 邱金恒、郑斯平、黄其荣等,北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测,大气科学,2003, **27** (1), 1~7.
- 16 任丽新、游荣高、张育堂,0~30km 大气气溶胶的垂直分布,科学通报,1984, **18**, 1121~1124.
- 17 孔琴心、刘广仁、王庚辰,南极中山站上空大气臭氧的直接测量,南极研究,1996, **8** (1), 56~64.
- 18 孔琴心、王庚辰、刘广仁等,大气臭氧垂直分布的电化学测量,大气科学,1992, **16** (5), 636~640.
- 19 Wang Gengchen, and Wang Yingjian, Ground-based and balloon-borne measurements of atmospheric ozone, In: *Adv. in Solar-Terrestrial Science of China*, Science Press, Beijing, 1992, 223~234.
- 20 吴北婴、吕达仁、孙金辉,曙暮光天光光度计,科学通报,1992, **37** (15), 1437~1438.
- 21 章文星、王普彩、李卫、吴北婴,太阳一天光光谱自动观测系统观测的初步分析,地球环境和气候变化探测与过程研究,吕达仁主编,北京:气象出版社,1997, 159~165.
- 22 吕达仁、李卫、李福田等,长春地区紫外光谱(UV-B, UV-A)辐射观测和初步分析,大气科学,1996, **20** (3), 343~351.

- 23 Lu Daren, and Li Wei, Observation and Modelling of Surface Ultraviolet (UV-A, UV-B) Spectral Radiances, From Atmospheric Circulation to Global Change, China Meteorological Press, 1996.
- 24 吴北婴、吕达仁, 用球面大气辐射传输模式研究平流层气溶胶长期变化——物理过程分析, 大气科学, 1988, 特刊, 286~300.
- 25 Wu Beiyong, and Lu Daren, Simulation of the Intensity and Polarization of Skylight During Twilight Period, *Adv. Atmos. Sci.*, 1988, **5** (1), 15~26.
- 26 Wu Beiyong, and Lu Daren, Retrieval of Stratospheric Background Aerosol scattering coefficient from Twilight Polarization, *Applied Optics*, 1988, **27**, 4899~4906.
- 27 关虹、吕达仁、吴北婴, 用曙暮光时的天光光强反演平流层气溶胶散射系数廓线, 大气科学, 1992, **16** (2), 216~227.
- 28 Zhou Jun, Hu Huanling, and Gong Zhiben, Lidar Observation of Mt. Pinatubo Cloud Over Hefei, *Chinese Science Bulletin*, 1993, **38** (16), 1373~1376.
- 29 Wu Beiyong, and Lu Daren, Monitoring the Evolution of 1991 Pinatubo Aerosol over Beijing by Combining Twilight Observations with Lidar Detection, *J. Geophysical Research*, 1993, **98** (D12), 22995~23001.
- 30 Lu Daren, Liu Jinli, and Li Fang, Ground-based Remote Sensing of the Size Distribution of Pinatobus Volcanic Cloud, *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, **8**, 117~120.
- 31 陈洪滨、吕达仁、许丽生, 利用 SAGE 资料分析皮纳图博火山爆发前后平流层气溶胶的变化特征, 科学通报, 1994, **39** (22), 2084~2087.
- 32 汪宏七、赵高祥, 火山气溶胶的辐射影响, 大气科学, 1992, **16** (6), 755~760.
- 33 Wu Beiyong, Lu Daren, and Fu Qiang, Radiative effects of Pinatobu aerosol in the middle latitudes of the Northern hemisphere, *Theor. Appl. Climatology*, 1995, **51** (1), 13~23.
- 34 孙金辉、夏其林、邱金桓等, 激光雷达探测南极平流层, 南极研究, 1995, **7** (1), 62~68.
- 35 赵永净、孔琴心、王庚辰等, 南极昭和站平流层臭氧变化与 NAT 凝结温度关系, 应用气象学报, 1996, **7** (1), 118~123.
- 36 邱金桓、吕达仁, 空间激光雷达遥感大气气溶胶分布反演算法, 大气科学, 1988, 特刊, 258~270.
- 37 Qiu Jinhuan, and Lu Daren, On Lidar Application for Remote Sensing of the Atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, 1991, **8** (3), 369~378.
- 38 Zhou Xiuji, and Luo Chao, Ozone valley over Tibetan Plateau, *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, **8** (4), 505~506.
- 39 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, **40**, 1396~1399.
- 40 陈洪滨、许丽生、王普才, 利用 SAGE II 遥感分析我国上空平流层臭氧的分布与变化特征, 应用气象学报, 1995, **6** (2), 240~245.
- 41 王连英、黄荣辉, 北半球大气中臭氧总含量的季节与年际变化, 大气科学文集, 北京: 科学出版社, 1990, 281~288.
- 42 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, 北京: 科学出版社, 1989, 93~127.
- 43 王卫国、郭世昌、杨利群, 大气臭氧层的垂直分布及其变化的研究, 地球物理学报, 1990, **33** (6), 639~646.
- 44 Bian Jianchun, Chen Hongbin, Zhao Yanliang et al., Variation Features of Total Atmospheric Ozone in Beijing and Kunming Based on Dobson and TOMS Data, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (2), 279~286.
- 45 魏鼎文、赵延亮、秦芳, 中国北京和昆明地区大气臭氧层的异常变化, 科学通报, 1994, **39** (6), 1509~1511.
- 46 吕达仁、李卫, 南极地区 UV-B 气候学现状与展望, 南极研究, 1994, **6** (4), 59~66.
- 47 白建辉、王庚辰, 北京地区太阳紫外辐射的基本特征, 太阳能学报, 1993, **14** (3), 245~250.
- 48 白建辉、王庚辰, 晴天地面太阳紫外总辐射的观测结果和统计计算方法, 太阳能学报, 1993, **14** (4), 363~370.
- 49 白建辉、王庚辰, 北京地区太阳紫外辐射的观测与分析研究, 大气科学, 1994, **18** (3), 341~347.
- 50 白建辉、王庚辰, 1979~1996 年期间北京地区大气紫外总辐射的变化趋势, 大气科学, 1998, **22** (5), 709~

717.

- 51 白建辉、王庚辰、胡非, 近 20 年北京晴天紫外辐射的变化趋势, 大气科学, 2003, **27** (2) 273~280.
- 52 熊效振、王庚辰, 中国地区近地面太阳紫外辐射的分布及其对大气臭氧层破坏的响应. 大气科学, 1993, **17** (5), 611~620.
- 53 Lu Daren, and Li Wei, Observation and Modeling of Surface UV Spectral Radiance in China, In: *Current Problems in Atmospheric Radiation*, Edit. by W. L. Smith and K. Stamnes, A. Deepak Publishing, 1997, 934~937.
- 54 周秀骥、郑向东、陆龙华等, 1993 年中山站地区“臭氧洞”和 UV-B 的特征分析, 南极研究, 1994, **6** (4), 14~23.
- 55 王普才、吕达仁、李占清, 卫星遥感地面紫外辐射的参数化方法, 大气科学, 2001, **25** (1), 1~15.
- 56 Lu Daren, T. E. VanZandt, and W. L. Clark, VHF Doppler Radar Observations of Buoyancy Waves Associated with Thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41** (2), 272~282.
- 57 Lu Daren, T. E. VanZandt, and W. L. Clark, Mesoscale Spectra of the Free Atmospheric Motion in Mid-latitude Summer-Universality and Contribution of Thunderstorm activities, *Adv. Atmos. Sci.*, 1987, **4** (1), 105~112.
- 58 Lu Daren, and Li Wei, Frequency and wave number Spectra of Atmospheric Meso-and Small-Scale Motion in the Mid-Upper Stratosphere, *Adv. Space Res.*, 1997, **19**, 599~602.
- 59 Yi Fan, J. Klostermeyer, and R Ruster, VHF radar observation of gravity wave critical layers in the mid-latitude summer mesopause, *Geo. Res. Lett.*, 1991, **18** (4), 697~700.
- 60 Yi Fan, J. Klostermeyer, and R. Ruster, VHF radar observation of gravity wave critical layers in the polar summer mesopause region, *Annalen Geophys.*, 1992, 235~247.
- 61 张绍东、易帆、J. Klostermeyer 等, 极区中层惯性重力波琳阶层的 VHF 雷达观测, 空间科学学报, 1996, **16** (3), 227~232.
- 62 马瑞平, SOUSY-VHF 雷达探测中间层大气的结果, 空间物理与探测技术, 1988, **8** (2), 108~113.
- 63 Li Wei, and Lu Daren, Application of MEM Spectral Estimation to MU Radar Observation, *Acta Meteorologica Sinica*, 1991, **5** (3), 293~298.
- 64 Huang Ronghui, and K. Gambo, The response of a hemispheric multi-level atmosphere to forcing by topography and stationary heat source, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**, 78~108.
- 65 黄荣辉、严邦良, 热带基本气流对冬季北半球中高纬准定常行星波的影响, 气象学报, 1988, **46** (2), 154~163.
- 66 黄荣辉、严邦良, 用线性化全球原始方程谱模式研究地形强迫行星波垂直传播特征, 大气科学, 1993, **17** (3), 257~267.
- 67 严邦良、黄荣辉, 34 层线性球面原始方程谱模式与模式大气对地形强迫的响应, 大气科学, 1991, **15** (1), 16~27.
- 68 Chen Wen, and Huang Ronghui, The modulation of planetary wave propagation by the tropical QBO zonal winds and associated effects in the residual meridional circulation, *Contr. Atmos. Phys.*, 1999, **72** (2), 187~204.
- 69 陈文、黄荣辉, 准定常行星波对大气中臭氧运输的动力作用, 大气科学, 1995, **19** (5), 513~524.
- 70 陈文、黄荣辉, 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究 I. 常定流的情况, 大气科学, 1996, **20** (5), 513~523.
- 71 陈文、黄荣辉, 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究 II. 波流相互作用的情况, 大气科学, 1996, **20** (6), 703~712.
- 72 Chen Wen, and Huang Ronghui, The propagation and transport effect of planetary waves in the northern hemisphere winter, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (6), 1113~1126.
- 73 马瑞平等, 用全球原始方程半谱模式研究 QBO 对行星波传播的影响, 空间科学学报, 1992, **12** (3), 205.
- 74 谢应齐、郭世昌、王卫国等, 昆明大气臭氧层的持续减少及其与太阳活动关系的研究, 云南大学学报, 1994, **16** (增刊 1), 1~6.
- 75 郭世昌、王卫国、杨忠诚等, O₃ 层演变、气候变化和太阳活动与农作物产量间的关系研究, 云南大学学报, 1994, **16** (增刊 1), 7~14.
- 76 Yan Muhong, and Zhang Yijun, Solar activity and atmospheric electric processes, *Advances in Solar-Terrestrial*

Science of China, Science Press, Beijing, 1992, 235~247.

77 Lu Daren, Huang Zhen, and Shen Mei, On Research of Solar Activities/Climate Weather Relationship, *Advances in Solar-Terrestrial Science of China*, Science Press, Beijing, 1992, 227~234.

78 Zhang Huijun, and Lu Daren, Effects of Wind Shear on Atmospheric Gravity Wave Spectrum, *Acta Meteorologica Sinica*, 1989, **3** (1), 43~53.

79 Zhang Huijun, and Lu Daren, Propagation of Internal Inertio-Gravity Wave Spectra in Vertical Wind Shear Environments, *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, **4** (2), 189~200.

80 易帆、李钧, 剪切流动中短周期升重力波的产生与发展, 中国科学 (A 辑), 1991, **36** (4), 290~298.

81 易帆、李钧、熊健刚, 损耗大气中重力波的产生与发展, 地球物理学报, 1993, **36** (4), 409~416.

82 易帆、肖佐, 损耗大气中随机重力波场的传输方程, 空间科学学报, 1993, **13** (4), 278~284.

83 易帆、肖佐, 损耗大气中惯性重力波的非线性相互作用方程及其初步讨论, 空间科学学报, 1994, **14** (2), 125~132.

84 熊建刚、易帆、李钧, 地形对正压大气 Rossby 波非线性相互作用的影响, 应用数学和力学, 1994, **15** (6), 555~563.

85 Chen Zeyu, and Lu Daren, Numerical simulation on stratospheric gravity waves above mid-latitude deep convection, *Adv. Space Res.*, 2001, **27** (10), 1659~1666.

86 Huang Ronghui, and Chen Jinzhong, Geotropic adaptation process and excitement of inertial-gravity waves in the stratospheric spherical atmosphere, *Chin. J. Atmos. Sci.*, 2002, **26** (3), 289~303.

87 杨健、吕达仁, 平流层—对流层交换研究中若干问题的评述, 地球科学进展, 2003, **18** (3), 231~238.

88 Cong Chunhua, Li Weiliang, and Zhou Xiuji, Regional mass exchange between stratosphere and troposphere over Tibetan and neighborhood area, *Chin. Sci. Bull.*, 2001, **46** (22), 1914~1918.

89 王卫国、郭世昌、钱俊, 昆明地区大气臭氧准两年振荡的模拟研究成果, 云南大学学报 (自然版), 1994, **16** (增刊 1), 40~47.

90 Yang Peicai, G. P. Brasseur, J. C. Gille et al., Dimensionalities of ozone attractors and their global distribution, *Physica*, 1994, **D76**, 331~343.

91 Yang Peicai, and G. P. Brasseur, The non-linear response of stratospheric ozone to NO_x and ClO_x perturbation, *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**, 717~720.

Advances in Middle Atmosphere Physics Research

Lu Daren and Chen Hongbin

(Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environmental Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Research on middle atmosphere including stratosphere and mesosphere has been an active area since 1970s for both atmospheric science and solar-terrestrial physics community, owing to its significance of understanding upper-lower atmosphere coupling and global climate and environment. Stared in the end of 1970s, this area has been selected as an active area in Chinese scientific community, among them IAP is one of the major research institutes. In this paper, brief reviews are conducted in the following topics: (1) development of observation facilities and methodology; (2) monitoring and analysis of atmospheric ozone and stratospheric aerosols; (3) planetary wave propagation in the stratosphere and its function on global ozone distribution; (4) gravity wave propagation in the middle atmosphere; (5) dynamic, physical, and chemical issues of the stratosphere-troposphere exchanges.

Key words: middle atmosphere; ozone; stratospheric aerosols; stratospheric planetary waves; gravity waves