

大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾^{*}

吕达仁 王普才 邱金桓 陶诗言

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 大气遥感作为大气科学中的重要基础与技术支柱, 是 20 世纪 60 年代以来迅速发展的一门年轻学科。中国大气科学工作者在这方面也紧密结合国家需求与国际学术前沿, 从 20 世纪 60 年代开始在理论研究, 技术发展与实验研究, 以及在气象、环境和国防应用等多方面开展了活跃的研究与发展工作。作者主要对中国科学界在大气遥感与卫星气象学发展方面作简要回顾, 并着重介绍中国科学院大气物理研究所在大气遥感的基础与方法研究方面的一些进展, 以及对大气遥感发展中的作用。主要内容包括: 中国大气遥感的简要发展过程、卫星气象的早期发展、卫星红外遥感的基础理论研究、大气微波遥感的理论与实验研究、大气激光遥感研究、大气光学遥感研究。

关键词: 卫星气象学; 光学遥感; 激光雷达; 红外遥感; 微波遥感

1 引言

大气遥感是 20 世纪 60 年代以来发展最为迅速的学科分支之一, 也是大气科学发展的关键技术支柱之一。它的发展一方面取决于气象与大气科学研究和应用发展对全球和区域大气特征的时空连续观测的需求, 另一方面也是近代物理学、传感器与计算机信息技术、大气物理学密切结合的产物, 是高新技术与基础研究相结合并紧密围绕应用需求开展研发的产物。电磁场理论、分子与原子光谱理论、波与介质相互作用的理论构成了遥感的原理基础。微波雷达与辐射计技术、红外技术、激光技术和光谱学技术、声学遥感器技术、卫星平台等航天航空平台技术以及计算机、通信技术是实现大气遥感的技术支柱。基于对大气与地表的物理化学过程特征理解为基础的遥感地球/大气科学模型是遥感获得结果的应用理论基础。这里的遥感地球/大气科学模型既包括了直接建立传感器所测波动/辐射量与待测大气/地表参数之间定量关系的直接物理模型, 也包括不能直接建立定量遥感方程但通过对大气/地表过程中各参数定量关系作为约束而可以获得待测大气/地表参数的“间接”遥感科学模型。在解决所有以上步骤中, 特别是遥感反演方法的建立中, 对数学物理求解方法也提出了需求和挑战。所有以上各方面构成了这一学科分支的研究内容与科技前沿。大气遥感这一学科名词的广泛应用始于 20 世纪 60 年代后期, 但大气遥感的规模性研究应用则始于 20 世纪 40 年代后期, 当时微波雷达迅速应用于区域云雨结构的监测与强天气的报警, 对气象学应用起到重要的推动作用, 并迅速在以后 10 多年内形成了一门雷达气象学, 即微波主动大气遥感

2003-05-20 收到

^{*} 国家自然科学基金资助项目 40027002、40175008 和 40075007 共同资助

学,至今仍在蓬勃发展。而 1957 年苏联第一颗人造地球卫星上天和 1960 年美国第一颗气象卫星上天则标志着大气遥感借助于卫星平台,可以实现对全球大气状况的监视与测量。由于卫星载荷重量、功耗与体积的限制,在相当长时期内未能将微波雷达等主动遥感技术应用于卫星遥感,利用光学、红外和微波被动测量来遥感大气参数的研究就成为卫星大气遥感的主流。这一类工作极大地推动了卫星遥感原理与技术的深入探索。在原理上对分子光谱与遥感波段(通道)选择、电磁波散射、多次散射辐射传输,以及相应的快速算法、反演方法等多方面形成了迅速发展的局面。近 40 年,大气遥感已发展成为大气科学最为活跃的支柱学科之一。简而言之,前 20 年更多着重于大气遥感原理与理论系统的建立、初步技术试验,以及急需而又相对易于实现的应用(如卫星云图的天气学应用),后 20 年则更多着重于系统深入的试验应用,并且更深入地将大气遥感与大气科学的其他分支相互渗透,在建立遥感地球/大气科学应用模型方面趋向深入和成熟。

我国大气遥感的发展与国际是同步的,在 20 世纪 60 年代已经得到了国家和相关学者的关注。在业务应用上,气象雷达的发展是地基大气遥感的重要应用。我国利用国外气象卫星的研究应用始于 20 世纪 70 年代初。我国自 20 世纪 70 年代初开始自主气象卫星—风云系列的研发工作。至今取得了极轨与地球同步气象卫星二大系列举世瞩目的成就。这些成就集中于中国气象局的业务系统内。与此同步,我国大气遥感在研究所和大学内亦在不同阶段取得了研究进展,构成了对国际大气遥感研究的实质贡献。本文将对我国大气遥感研究发展作一简单回顾,并简要列举我国大气遥感研究(着重在原理和方法上)各阶段的一些重要进展。本文内容更多偏重于中国科学院大气物理研究所(简称大气物理所)在这方面的。

2 我国大气遥感的发展回顾

20 世纪 60 年代初期,我国大气科学界就开始了大气遥感相关的研究与应用试验。利用 Dobson 紫外光度计探测大气臭氧总量是我国最早的大气遥感研究^[1]。1958 年国际地球物理年期间,赵九章主持引进了该项设备并开始了研究工作,在此期间中央气象局观象台与中国科学院地球物理研究所(简称地球物理所)二室(后为中国科学院大气物理研究所)分别引进了气象雷达,开始了微波雷达观测云雨的研究。这一工作一方面从气象业务上为中小尺度气象与业务提供了重要手段,从另一方面也促进了微波与大气云雨介质相互作用的基础研究。结合强风暴探测研究的迫切需求,顾震潮、周秀骥提出了地基对雷暴云的综合探测/遥感的设想,并主持了这一方向的研究,其主要成果后来总结于大气物理所专刊第 4 号《雷暴探测和雷电物理研究》^[2]中。其中的内容包括了利用闪电电磁辐射特征来做闪电定位的理论与技术研究,利用存在于大气自身的电磁辐射特征来了解大气过程与特征(参考射电天文学的发展,顾震潮提出建立射电气象学)。在此期间,结合大兴安岭森林防(雷击)火任务与雷雨云中小尺度研究计划,地球物理所二室开展了雷雨云多波段电磁辐射探测研究^[3]。为深刻理解这些放电与射电物理过程,赵燕曾等^[4,5]建立了高电压实验室进行闪电通道放电电磁特征和雨滴在云中强电场的行为实验。与此同时,利用中国科学院北京天文台沙河观测站刚建

成的 3.2 cm 射电望远镜,进行了对流云和雷雨云微波射电特征的实际观测^[6],发现了雷雨云的云雨热辐射和闪电脉冲微波非热辐射两类信息。上述工作均与国际前沿研究同时开展,并获得了新的认识。随着我国于 1963 年研制成红宝石激光器,大气物理所与上海光学精密机械研究所合作迅速开展了以测云和能见度等为目标的红宝石激光雷达研制,并于 1967 年研制成功我国第一台激光雷达,开始了一系列激光大气遥感理论与实验研究,并一直发展至今。

在发展地基大气遥感原理与技术的同时,充分利用美国气象卫星所发布的卫星云图资料是一项具有重要应用发展的技术和研究工作。1969 年,大气物理所首先研制成可用以接收美国气象卫星云图广播资料的 APT 接收机^[7]。从而在我国开始了卫星云图在天气分析和预报应用的新局面。随后,大气物理所又研制成功高分辨率卫星云图 HRPT 接收机,进一步推进了我国卫星天气学的发展。

我国独立发展气象卫星任务始于 20 世纪 70 年代初,这一重大需求大大促进了卫星遥感理论与技术发展。在中央气象局总抓气象卫星事业发展的局面下,大气物理所曾庆存及其研究组在卫星红外遥感方面进行了深入系统的理论分析与研究,在总结国际已有研究成果与不足的基础上建立起完整的卫星红外遥感反演温度、水汽垂直分布的系统理论^[8]。这一理论分析同时适用于其他波段的被动遥感。

与红外卫星遥感发展的同时,微波遥感的理论与实验研究在 20 世纪 70 年代初期亦得到了重视。从“无球探空”的目标出发,北京大学赵柏林^[9]在我国首先研制了 O_2 5 mm 波段的测温微波辐射计,并对地基扫角法测量大气温度廓线进行了研究。大气物理所于 1976 年在国内首先研制了地基测雨微波辐射计,并投入了区域降水量的观测试验^[7]。随后,北京大学赵柏林研究组^[11]和大气物理所分别发展了多波长地基辐射计系统,用以综合遥感大气温度、水汽、云和降水。在地基理论与实验的同时,1975 年起周秀骥及其研究组^[12, 13]关于卫星微波遥感的理论研究在大气物理所得到了比较系统的发展。由于洋面微波发射率远低于 1,十分有利于水汽廓线的遥感,这方面的研究得到了重视。大气物理所将微波辐射计遥感与雷达遥感相结合^[14],在反演原理与传感器技术发展上推进了一步。

20 世纪 70 年代中期,大气光学遥感在大气物理所开始得到发展。利用多波段太阳光度计和激光雷达观测结果,我们获得了大气气溶胶总光学厚度及其在边界层中的分布。光学遥感的总目标是利用太阳直射和散射辐射的光谱与偏振探测,从中了解大气气溶胶和云的特征。由于光学遥感原理涉及包含多次散射的辐射传输理论与算法,形成了极大的挑战,也促使我国科学家们在多个方面有所突破,随着大气科学界对气溶胶、云和微量气体在气候、环境变化中重要性的认识的深入,大气光学遥感在我国和国际上一样得到重视。20 世纪 80 年代以来,由于美国 NOAA 气象卫星中 AVHRR 多波段扫描辐射计资料的广泛应用以及 MODIS 等一系列新的地球环境卫星资料的广泛应用,卫星光学遥感原理与应用研究亦愈加广泛和深入。

虽然大气遥感主体是利用电磁波谱中的不同波段,特别是卫星大气遥感只能利用电磁波谱,但是在地基遥感中声波遥感也是重要的一方面,特别是大气边界层温度和风的遥感。大气物理所科学工作者从 20 世纪 70 年代中期就开始研制声雷达,并不断投入边界层的探测应用^[15]。

如果说 20 世纪 80 年代中期以前，国内外大气遥感研究主要在建立理论体系，探索各种探测原理并进行相应的技术试验，那么近 20 年的大气遥感则更多地从应用目标出发结合研究应用对象，采用多种遥感手段，融合非遥感手段和其他信息，更好地解决所面临的实际问题，而在这一过程中提出了新的理论问题和解决方案，如多种传感器遥感对多个大气与地表特征的同时遥感问题、四维同化问题等。在这些研究中大气遥感与大气动力学、物理学与化学研究，甚至与地球科学的其他分支更多地融合在一起，形成地球环境的综合遥感与同化。一些 20 世纪 90 年代以来的新遥感手段，如 GPS 遥感也得到了迅速的发展应用^[16]。

3 卫星气象学的早期发展

自 1957 年第一颗人造地球卫星上天后，全球第一颗气象卫星美国 TIROS-1 于 1960 年发射成功并发回了首幅卫星云图。1966 年以后，美国气象卫星开始从全球发布星上实时观测的卫星云图。在我国，大气物理所首先于 1969 年研制成低分辨率卫星云图接收设备（APT），随后又研制成高分辨率卫星云图接收设备（HRPT）。1978 年在日本发射地球同步气象卫星（GMS）的同时，大气物理所提前准备了卫星云图接收设备，在 GMS 试验发布资料时，即收到了信息。由于卫星云图的重要价值，其接收设备一开始便获得了推广，随后在 20 世纪 70 年代初开始，在陶诗言等气象学家的主持下，以台风与热带风暴等以往难以获得资料的灾害性天气系统的云图分析为重点，同时发展了云图用于暴雨分析与预报、监视陆上的强对流天气等，迅速发展了卫星天气学研究与应用。以下只是早期工作的一点介绍。

从卫星云图上能直观地看到台风的螺旋云系结构以及台风眼，从 GMS 云图还首先看到了西太平洋上多个台风同时存在的现象。朱宗申等^[17]利用卫星云图研究台风在海上的移动，总结了云系特征与移动路径的关系。陈联寿^[18]研究了登陆后台风的云图特征。陶诗言总结了在陆地上典型四类台风路径，即继续西行，登陆后向北行，登陆后向东北行出海后变成气旋波以及登陆后向东北行出海仍维持台风，他发现各类台风在云图上都有比较清楚的特征，其结果可作为判别台风在陆地上移动的判据。李玉兰等^[19]利用卫星云图做 24~48 小时的台风路径预报，取得了较好成果。范蕙君和丁一汇^[20]利用卫星云图分析南海台风发生、发展的云系演变，发现南海台风的发生和发展，与西太平洋台风有不同的地方，南海台风有一种是在热带辐合区生成的，另一种与冷空气活动有关。方宗义等^[21]用气象卫星扫描辐射仪图片分析了西太平洋高空流场，用于研究热带扰动强度的变化。赵思雄^[22]从卫星云图估计在台风中的高低空流场及其与台风强度变化的关系，他从云图获得了台风中 850 hPa 和 150 hPa 的风场。朱宗申等^[17]还根据台风云系和四周系统的配置，以及台风本身云型的特点，确定台风在登陆时的降水分布，解决台风警报中的难题。通过不断分析和总结，中央气象台（现为中国气象局）和中国科学院大气物理研究所卫星资料联合分析组编制了一个可供遵循的利用 GMS 云图资料预报台风的流程^[23,24]，用于判断扰动是否发展，确定台风中心位置，估计台风强度及大风范围，预报台风移动路径，以及预报台风登陆后的暴雨情况，在业务应用中取得了较好的效果。

研究热带辐合区是卫星云图的另一个应用。研究结果揭示了热带辐合区中的云系的加强和减弱与南半球的锋面云系活动有关^[25]。它还被用来对副热带高压进行分析,帮助确定副热带高压脊线^[26]。一些在天气图上分析不出来的热带“云团”尺度的天气系统从卫星云图中可以发现。有许多云团和天气图上的系统(如台风、东风波、高空冷涡)是相联系的,但是也有一些云团在天气图上反映不出来,这些云团有时候也能引起强烈的暴雨和大风天气现象。

卫星云图还被广泛应用于其他天气系统的分析,包括温带气旋和高空切断冷涡、锋面云系、高空急流云系、西南低涡等天气系统的分析。

自从 20 世纪 80 年代初以来,气象卫星云图已广泛应用于各种尺度天气学的分析与预报应用中,出现了大批应用研究成果。可以说卫星云图分析已经成为天气学研究中的基础部分和基本手段之一。部分结果可参考文献 [27]。

4 卫星红外遥感的基础理论研究

20 世纪 70 年代,我国启动气象卫星发展计划,对大气遥感研究工作者提出了重大的挑战。在确定以卫星红外遥感大气温湿廓线作为主攻方向后,曾庆存及其研究组在国际已有工作的基础上,在理论基础特别是红外反演方面进行了深入分析,提出了系统的理论观点与反演方法,将数学物理基础与大气温湿分布以及地表特征相结合,澄清了国际上当时存在的一些理论上的混乱与不确切之处。曾庆存^[8, 28]系统地总结了卫星红外遥感大气温度和大气成分(特别是水汽)垂直分布的两类普遍性的遥感方程,即频谱法和扫描法所对应的遥感方程的适定性问题。对于频谱法测温,他指出为满足线性第一类 Fredholm 方程有解必须加上的物理约束,包括首先大气柱处于平均的平衡状态,并在实际观测有误差时对最优近似光滑解的限制。在具体求反演解时,提出了一种迭代法,充分利用遥感方程中核函数在有限区域内不为零,并具有极大值位置(高度)的特点,提出具有稳定与光滑解的步骤。这一方案是十分有效的。对于频谱法测水汽(及其他大气成分),曾庆存澄清了有效辐射层在水汽遥感中的不适用性,提出了“最佳信息层”的概念,即对于某一频段(通道),其卫星所测辐射量变化对某高度的水汽变化最敏感才是反演该高度水汽的有效频段,可获得该层的最佳信息。研究表明有效信息层一般不同于最佳信息层。基于以上分析,结合大气水汽实际分布集中于近地的实际情况,证明了除非有其他辅助信息约束,频谱法难以获得低层大气水汽分布信息。在扫描法的理论研究中,曾庆存证明了遥感方程有解且唯一,解对测值误差是稳定的。在实际遥感中由于传感器角分辨率的有限性,其高度分辨率以及解对观测误差的稳定性也需要深入讨论。

在建立卫星红外遥感的理论系统同时,黄荣辉等^[29]、曾庆存等^[30]讨论了测温的通道选择问题。袁重光和曾庆存^[31]、黄荣辉等^[32]以及徐飞亚等^[33]分别讨论了遥感温度的迭代法、经验正交函数的应用与改进等。李崇银等^[34, 35]研究了红外水汽遥感反演原理和方法。

上述是卫星红外遥感基础研究的早期工作。由于我国在较长时间内未能有自己的卫星红外测温仪上天,这方面的研究未能继续进行。此后,国家卫星气象中心黎光清

及研究组对红外遥感温度反演方程的适定求解与通道选择进行了细致的研究,提出改进的有偏估计解^[36, 37]和最佳测值条件分析^[38]。随着我国将美国 NOAA 气象卫星红外探测器 HIRS/2 资料应用于气象分析,国家卫星气象中心更多地对业务系统的建立作了大量工作(有关工作可参考文献 [27])。对美国 Smith 等^[39]提出的同时物理反演算法 (SPRM) 作了引进、分析和改进。SPRM 的基本思想是通过求解多参数线性化亮温泛函方程直接同时反演出相关地表气象气数和温湿廓线。从业务应用角度出发:黎光清等^[40~42]作了大量的改进工作,包括建立温湿参数初估值分析场、光谱特性的统计修正、针对我国大陆与高原地表的通道合理选择等,通过大量业务试验,形成了可应用于气象业务改进的 SPRM,即 ISPRM。

20 世纪 80 年代中后期,卫星红外遥感由于分光技术,包括 Fourier 光谱仪技术的进一步成熟,可以实现的光谱分辨率达到了分辨大气成分单个谱线的水平,由此开始了大量通道同时遥感大气温湿廓线和多种微量成分的方案。美国 EOS/AQUA 卫星上的大气红外探测仪 (AIRS) 正是这方面的第一个成功之作。事实上,与国际这方面的早期研究同时,关于大量高光谱分辨率^[43]通道同时遥感应用的原理,赵高祥等^[44]也早在 1980 年就提出了有关多个宽通道的应用设想。

5 大气微波遥感进展

5.1 气象雷达主动遥感

从学科上讲,从 20 世纪 40 年代开始出现气象雷达是典型的重要大气遥感。自从 1960 年前后中央气象局和中国科学院地球物理研究所分别引进了首批气象雷达,开始了研究与业务应用。几十年来,我国气象雷达的技术发展与业务应用网的建设已经历了三代以上的重大推进,至今已进入全国 Doppler 气象雷达组网阶段,逐步跨入气象装备先进国家的行列。这方面我国已有大量雷达气象应用研究(不在本文介绍之列)。除了云雨测量雷达外,晴空风和湍流探测的 VHF 和 UHF Doppler 雷达研制与应用亦得到了发展。中国气象科学研究院于 1989 年研制成功用于对流层风廓线探测的 UHF 雷达。大气物理所于 80 年代后期开始研制用于中层大气的大型 VHF Doppler 雷达,1993 年实现了平流层风与湍流的首次探测,2000 年完成了香河 VHF/ST 雷达,获得了风、波动、 C_n^2 等多个大气动力参数的垂直结构^[45]。

5.2 卫星微波遥感的早期原理研究

针对卫星微波遥感温湿廓线在洋面和一般有云条件下较红外遥感有较大优越性的特点,20 世纪 70 年代中期,大气物理所周秀骥及其研究组^[12, 46]以微波遥感为主要对象探讨了具有第一类 Fredholm 积分方程形式的遥感方程的解的性质,指出方程中的核(权重)函数起着空间滤波的作用,它决定了反演的最终空间分辨率,而观测误差、模式误差以及计算误差的存在使空间分辨率降低。基于此,提出了一个针对具体核函数的探讨最优化通道组合的方法。利用这一方法,进行了微波测温的数值试验^[47]。针对水汽分布遥感方程的非线性特征,黄润恒^[48]和薛永康^[49]提出了用 Monte-Carlo 方法反演水汽分布的试验。周秀骥^[50]提出利用微波辐射起伏进行大气动力场遥感的设想。

5.3 地基微波被动遥感

在地基大气被动微波遥感方面, 20 世纪 70 年代初期, 赵柏林等开始在我国首先研制用于地基遥感大气温度分布的氧气吸收带微波辐射计^[9], 发展了有关的反演方法, 随后扩展到水汽和云和降水的微波遥感^[11]。根据 1965 年利用射电望远镜观测雷雨云的经验^[6], 大气物理所于 1976 年在国内首先研制成用于降水遥感的地基 X 波段辐射计, 并迅速投入了观测。在此基础上, 吕达仁和林海等人提出利用多角度微波辐射计观测来估算区域降水总量的设想, 并进行了初步实验^[7]。由于微波辐射计比气象雷达在经济和维持要求上相对低廉, 这一方法作为辅助监测手段至今仍有其价值。

在比较充分地分析微波雷达主动遥感测雨和微波辐射计被动遥感测雨各自的原理、特点与长处后, 吕达仁和林海^[14]提出了微波主、被动联合遥感云雨分布的原理, 并提出了一套迭代反演算法。这一原理和迭代反演算法也同样适用于飞机和卫星微波主、被动遥感云雨分布^[51, 52]。基于这一原理, 大气物理所研制了双波长雷达—辐射计系统, 用于地基降雨分布测量, 取得了试验的成功。

20 世纪 80 年代中期以来, 由于云含水量和水汽在气候系统研究中的重要性得到了重视, 大气物理所研制的双波长(水汽 22.235 GHz 和云水 35.0 GHz)微波辐射计在陆上云水和水汽变化的监测中发挥了作用^[53~60], 并先后 5 次投入了国际气候研究计划(WCRP)所组织的有关热带海洋—全球大气相关的赤道西太平洋海域野外观测(TOGA 和 TOGA/COARE)系统观测^[61, 62]。20 世纪 90 年代中期以来, 水汽和云水微波辐射计正在人工影响天气作业指导应用中发挥作用。针对地基微波辐射计应用地域越来越宽广的情况, 物理统计反演方法是唯一实用的反演方法。吕达仁等^[63]发展了一个具有全球普适性的大气降水反演方法, 利用了微波辐射亮温和地面气象观测反演水汽总量。魏重和吕达仁^[64]发展了一个全球普适的双频道遥感云水和水汽的反演算法。

5.4 卫星微波遥感的近期研究

1990 年以来, 国际卫星微波遥感获得了长足的发展。在温湿廓线的遥感方面, 新一代 NOAA 卫星将红外与先进微波探测单元(AMSU)联合或单独应用, 大大推进了反演的精度和在云雨天的适用范围。而随着全球气候变化对地球系统水循环的关注, 卫星微波遥感在这方面发挥着更大的作用。以美国国防气象卫星(DMSP)的微波遥感成像仪(SSM/I)为代表, 一系列卫星微波传感器在大气遥感中发挥作用。我国大气微波遥感界一方面积极参与了国际合作研究, 发展方法, 应用资料, 另一方面也为发展我国的卫星微波大气遥感技术而努力。在“神舟”4 号飞船上试验了多模态微波传感器, 在“风云”3 号系列卫星中将应用微波遥感探测单元。

在微波遥感水汽和降水的方法研究中, 卞建春等^[65, 66]发展了利用神经网络对 SSM/I 遥感降水强度的反演算法, 显示出较高的精度。吕达仁等^[67]综合了经验统计反演法以及概率配对法等, 提出了综合统计算法。陈洪滨等^[68, 69]发展了水汽反演方法针对降水云的不均匀特征, 林龙福等^[70]发展了非对称侧边界三维不均匀降水云的微波辐射模式, 开展了对于非均匀降水云与假定水平均匀降水云亮温差异的订正。刘锦丽等^[71, 72]研究了微波主、被动结合空基遥感云水和降水分布。针对层状云的动力物理模式与微波遥感的结合, 崔哲虎等^[73]将层状云模式的各种强微物理量输出与微波辐射传输模式结合, 探讨了融化冰粒对微波亮温及反演精度的作用。对于散射计这一主要用于海面风的主

动遥感器，陈洪滨等^[74]提出了对遥感降水强度的应用可行性。

在卫星微波水汽和云水反演方面，陈洪滨等^[75,76]讨论了测水汽总量的最优波长，提出了云水总量的一个反演算法。陈洪滨^[77]还提出了利用接收星载微波发射机的辐射强度变化遥感云水总量的建议。

利用全球定位系统 GPS 差分接收信号来反演大气水汽变化是 1990 年以来国际发展迅速的遥感方法，我国北京大学、中国气象局、北京市气象局等单位也积极进行了试验^[16, 78~80]，取得了几个地点中尺度试验的成功。毛节泰等的试验表明，GPS 可以实现很高精度的水汽遥感。在区域 GPS 布网后，这一结果可以纳入短时预报与分析的同化系统中。我国也在开展利用低轨卫星组网接收 GPS 卫星的掩星信号来反演全球温度与水汽廓线的研究，并在同化的优化算法研究中已取得了进展^[81]。

6 大气激光雷达遥感

1960 年，国际上发展了第一台红宝石激光器，由于窄脉冲激光源具有高度单色性、窄时间脉冲、高脉冲功率，成为大气主动遥感极为理想的技术基础，为大气气溶胶和云的遥感以及基于不同的吸收和量子散射原理的大气气体成分探测提供了理想手段。1963 年，国际上第一台用于探测大气的激光雷达问世。我国大气科学界对这一新兴领域亦十分敏感。1963 年我国研制成红宝石激光器，1965 年中国科学院地球物理研究所二室（现大气物理所）即启动激光雷达研制计划，赵燕曾等和上海光学精密机械研究所联合研制成功我国第一台红宝石激光雷达，并开始了测云、测人工烟羽和一系列对大气气溶胶和相关参数的遥感研究。自 1967 年完成第一台激光雷达后，在 70 年代先后有三代激光雷达研制成功并投入研究（有关我国激光雷达早期研究结果可参阅文献^[82]）。20 世纪 80 年代初，大气物理所研制了我国第一台用以平流层气溶胶的中型激光雷达。此后，安徽光学精密机械研究所研制成平流层气溶胶探测激光雷达，随后进一步研制了平流层臭氧探测激光雷达。20 世纪 90 年代中期以来，中国科学院武汉物理与数学研究所发展了探测中层大气温度和密度的 Rayleigh 激光雷达和中间层顶区钠原子激光雷达，取得了宝贵的中层大气相关资料。2000 年以来，武汉大学亦发展了中层大气探测激光雷达。这些激光雷达的研制和应用，开拓了从近地直到中层顶区大气层特征的遥感能力，这些能力中的大部分是其他遥感手段在原理上难以做到的。

有关大气气溶胶特征的激光遥感工作，包括原理、遥感方程求解、以及遥感结果，邱金桓等^[83]已作了较详细的介绍。这里补充一点，利用气溶胶在一定条件下保守被动的特征，激光雷达的高重复频率探测亦可适用于大气湍流时空特征的探测研究^[84]。有关中层大气的激光雷达遥感，在文献^[85]中亦有较详细介绍，本文不再重复。

7 大气光学遥感

大气光学遥感从历史上讲是最古老最直观的遥感手段。目视天空的天色表明了无云大气洁净而少气溶胶的特性。气象卫星所拍摄的云图提供了天气系统最直观的宏观结构。从定量遥感而言，大气在光学波段的最主要光源是太阳辐射（包括紫外、可见

光、近红外和短波红外波段),其相互作用包括气体吸收、分子散射、气溶胶散射和吸收,还包括云的多次散射和吸收。在光学波长范围内,气溶胶粒子与光波的相互作用包含着最为丰富的信息。同时,特定的气体吸收波长可用于遥感大气某些微量气体的气柱总量与分布。在这些方面,我国大气遥感工作者进行了系统的研究。

在地基光学遥感方面,20世纪70年代开始了建立多波长太阳光度计遥感大气气溶胶光学厚度谱的观测研究并反演气溶胶粒谱,这类观测一直持续至今,提供了全国多个地点气溶胶光学厚度的气候性资料。在扩展气溶胶特征遥感的原理方法方面,我们发展了消光—小角度联合反演气溶胶谱^[86],利用前向散射观测反演气溶胶折射率^[87]。大气气溶胶光学厚度遥感的另一个进展就是利用气象台站的短波辐射通量资料反演气溶胶的等效光学厚度^[88]。这一方法的长处在于可充分利用气象台站过去几十年的历史资料,从而获得大气气溶胶光学厚度几十年来的变化趋势^[89],为全球气候变化中大气气溶胶辐射效应评估提供基础,并进而分析气溶胶变化的自然和人类活动原因。在卫星光学遥感反演气溶胶方面,吕达仁等^[90]和邱金桓^[91]分别提出了利用地表反射率谱特征和大气气溶胶厚度谱特征的约束,利用卫星多波段光学观测同时反演大气气溶胶光学厚度和地表反射率的原理方案,并为反演方法的实况提出了参数化方法。毛节泰等^[92]把地基气溶胶遥感和MODIS气溶胶产品相结合分析了气溶胶区域变化特征。有关这方面的许多结果已在文献[83,85]中进行了介绍。

在利用光传输效应遥感雨强和雨滴谱方面。吕达仁和吴北婴^[93]发展了国际已有的光闪烁测雨的原理和算法,提出了不同的雨强和雨滴谱反演方法。吴北婴和吕达仁^[94,95]进行了一系列数值试验结果表明这是十分有效的方法。王开祥和吕达仁^[96]用野外实验证实了这一反演算法,取得了成功的结果。此外,黄润恒^[97]很早就提出用光闪烁效应测风的原理方案。

云的地基观测长期靠目视主观判断,如何客观定量自动观测分析本站上空天空情况,并将大气辐射传输过程与云参数相联系,是大气遥感中的一个挑战性问题。从国际发展趋势看,采用全天空成像辐射仪进行云和晴天辐射参数的遥感是一个必然的方向,例如美国大气辐射测量(ARM)计划就采用了两种相关的探测云的设备。吕达仁等^[98]发展了全天空成像辐射技术,拟用全天空可见光多波段数字成像并转化为辐射率分布与热红外天空亮温分布相结合来综合遥感云量和云底高。目前,霍娟和吕达仁^[99]在云量的遥感上已得到初步结果。利用数字成像技术确定地面能见度的研究也由中国科学技术大学陶善昌等^[100]取得了良好的结果。

大气紫外遥感是大气遥感中一个历史长而又不断有发展的分支。利用地基 Dobson 紫外光度计遥感大气柱臭氧总量的工作在大气物理所从1958年开始。1978年后,这一观测成为WMO的全球地面观测站之一,一直至今。20世纪90年代以来,中国气象局亦建立了以Brewer光谱仪为手段的大气臭氧和紫外辐射观测系统,成为WMO新的业务站。在大气臭氧垂直分布的紫外反演中,早在20世纪60年代初,魏鼎文等^[101,102]就提出了反演权重函数的特殊性及其相应的反演解的不稳定性与高度分辨率的局限性。这是对被动遥感方程解非适定性的一个早期认识。在空间紫外遥感方面,李俊和吕达仁^[103]

针对美国的太阳紫外后向散射(SBUV)发展了大气臭氧廓线的非线性反演方法。郭

霞等¹⁾对紫外临边同时遥感大气密度和臭氧分布的可行性进行了研究，数值试验表明其可行性。

8 小结与讨论

上述简单的回顾，让我们看到我国大气遥感的研究与发展工作 40 多年来一直是紧密结合大气科学与应用需求，并在国际学术前沿上力求在多个阶段都有所创新，形成对国际学术界的贡献。从另一方面看，大气遥感是一项基础研究、高技术 and 重大应用密切结合的学科分支。它的发展不仅需要高水平的研究力量，还需要国家在技术和经济上的重大支持。作为发展中国家，在过去几十年中我国大气遥感研究所得到的支持是不足的，一些有价值的理论研究未能及时有效地落实到我国自己的实验与应用发展中。随着国力加强，这方面情况已有很大改观，例如在中国科学院知识创新工程中有所体现。而业务气象卫星及其应用的发展已得到国家更大的支持。

大气遥感作为地球遥感的一部分，其根本目的是提供全球和区域足够时空分辨率和精度的多种大气要素。在这一含义上，它与信息科学密切相关。充分利用信息科学的方法与技术将会促进大气遥感的发展。反之，大气遥感的许多进展亦将贡献于信息科学。例如，基于大气遥感的多种辐射传输算法，对反演数学物理问题的深入研究以及当前四维同化等结合大气遥感和大气科学其他分支的思想和方法正在地学遥感中起着十分积极的作用。更好的学科融合将使大气遥感在地球系统遥感中发挥更为积极的作用，这是今后发展的重要方向。

本文简要回顾我国，主要是大气物理所在这方面的进展，限于水平和时间，肯定有许多遗漏与错误之处，尚希批评和鉴谅。

感谢：陈英女士为本文作了文字录入和整理工作，特此致谢。

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，赵九章纪念文集，叶笃正主编，北京：科学出版社，1997，87~92.
- 2 中国科学院大气物理研究所，雷暴探测和雷电物理研究（中国科学院大气物理研究所专刊第 4 号），周秀骥主编，北京：科学出版社，1976，84pp.
- 3 吕达仁、陈仲文，我国某些地区的雷暴射电特征，雷暴探测和雷电物理研究（中国科学院大气物理研究所专刊第 4 号），周秀骥主编，北京：科学出版社，1976，36~51.
- 4 赵燕曾、谢威光，强电场中水滴放电的初步研究，雷暴探测和雷电物理研究（中国科学院大气物理研究所专刊第 4 号），周秀骥主编，北京：科学出版社，1976，12~23.
- 5 赵燕曾、谢威光、杨蕴玉，水滴表面的电晕放电及其电磁波辐射，雷暴探测和雷电物理研究（中国科学院大气物理研究所专刊第 4 号），周秀骥主编，北京：科学出版社，1976，24~28.

1) 郭霞、吕曜，吕达仁，紫外临边遥感同时反演大气密度和臭氧分布的可行性研究，自然科学进展，2003（已接收）.

- 6 吕达仁、胡欢陵, 雷雨天微波射电观测, 雷暴探测和雷电物理研究 (中国科学院大气物理研究所专刊第 4 号), 周秀骥主编, 北京: 科学出版社, 1976, 29~35.
- 7 中国科学院大气物理研究所, 卫星云图的接收与分析, 北京: 科学出版社, 1974.
- 8 曾庆存, 大气红外遥测原理, 北京: 科学出版社, 1974.
- 9 赵柏林、杜金林、刘式达等, 微波遥感大气温度层结的原理和试验, 大气科学, 1978, **2** (4), 323~330.
- 10 大气物理研究所 105 组, 地面微波辐射计和测定区域性降水的初步试验, 大气科学, 1978, **2** (4), 314~322.
- 11 赵柏林等, 微波遥感大气层结的原理和实验, 中国科学, 1980, (9), 874~882.
- 12 周秀骥等, 大气微波辐射及遥感原理, 北京: 科学出版社, 1982, 178pp.
- 13 中国科学院大气物理研究所微波遥感组, 中国晴空和云雨大气的微波辐射和传播特性, 北京: 国防工业出版社, 1982, 161pp.
- 14 吕达仁、林海, 雷达和微波辐射计测雨特性比较及其联合应用, 大气科学, 1980, **4** (1), 30~39.
- 15 Zhou Mingyu, Lu Naping, and Chen Yanjuan, The detection of the temperature coefficient of the atmospheric boundary layer by acoustic radar, *J. Acoustic. Scc. Am.*, 1980, **68** (1), 303~308.
- 16 Li Jianguo, and Mao Jietai, The approach to remote sensing of water vapor based on GPS and linear regression Tm in eastern region of China, *Acta Meteor. Sinica*, 1998, **12**, 450~458.
- 17 朱宗申、李玉兰等, 卫星云图在台风路径和台风分析中的初步应用, 台风会议文集, 上海: 上海人民出版社, 1972.
- 18 陈联寿, 关于台风路径趋势与大形势环流关系的初步探讨, 台风会议文集, 上海: 上海人民出版社, 1972.
- 19 李玉兰、王作述等, 卫星云图上云系与台风路径的关系, 中国科学院大气物理研究所集刊 (第 2 号), 北京: 科学出版社, 1974.
- 20 范蕙君、丁一汇, 南海台风的卫星云图特征和发生发展的一些特征, 中国科学院大气物理研究所集刊 (第 2 号), 北京: 科学出版社, 1974.
- 21 方宗义、陈隆勋等, 西太平洋地区赤道辐合带的初步分析, 中国科学院大气物理研究所集刊 (第 2 号), 北京: 科学出版社, 1974.
- 22 赵思雄, 用卫星云图估计台风高低空流场的相互作用及其对天气的影响, 全国气象卫星云图接收应用会议文集, 1976.
- 23 卫星资料联合分析应用组, 用卫星云图预报台风的方法 (上), 气象, 1980, (9), 24~26.
- 24 卫星资料联合分析应用组, 用卫星云图预报台风的方法 (下), 气象, 1980, (10), 25~27.
- 25 方宗义、陈隆勋等, 西太平洋地区赤道辐合带的初步分析, 中国科学院大气物理研究所集刊 (第 2 号), 科学出版社, 1974.
- 26 丁一汇, 南支槽与台风高空流场的相互作用及其对天气的影响, 全国气象卫星云图应用会议文集, 1976.
- 27 董超华、张文健 (主编), 气象卫星遥感反演和应用论文集 (上、下册), 北京: 海洋出版社, 2001.
- 28 曾庆存, 大气红外遥感探测的一些理论问题, 中国科学, 1978, (5), 552~559.
- 29 黄荣辉、曾庆存, 气温垂直分布的统计特征及红外遥感测法所需的通道个数问题, 气象卫星的红外遥测及反演 (一), 北京: 科学出版社, 1977, 1~13.
- 30 曾庆存、袁重光、黄荣辉, CO₂ 15 微米带红外测温的通道选择, 气象卫星的红外遥测及反演 (一), 北京: 科学出版社, 1977, 14~18.
- 31 袁重光、曾庆存, 求解气温遥测方程的迭代法, 气象卫星的红外遥测及反演 (一), 北京: 科学出版社, 1977, 19~25.
- 32 黄荣辉、袁重光、曾庆存, 用经验正交函数展开的方法来反演气温垂直廓线, 气象卫星的红外遥测及反演 (一), 北京: 科学出版社, 1977, 26~34.
- 33 徐飞亚、袁重光, 充分考虑地面温度对用经验正交展开法反演气温遥测方法的改进, 气象卫星的红外遥测及反演 (一), 北京: 科学出版社, 1977, 35~39.
- 34 李崇银、张道民、曾庆存, 关于大气湿度垂直分布段红外遥测, 大气科学, 1976, (1), 21~26.
- 35 李崇银, 红外单通道遥感大气湿度垂直分布, 气象学报, 1981, **39**, 118~122.

- 36 黎光清, 大气红外间接遥测方程的估计解和验前限制, 大气科学, 1984, **8** (4), 11~22.
- 37 黎光清, 求解大气红外间接遥测反演问题的最佳途径, 气象学报, 1984, **42** (4), 23~36.
- 38 黎光清, 地球大气红外间接遥测的最佳测值条件分析, 大气科学, 1985, **9**, (1), 37~44.
- 39 Smith, W. L. et al., Simultaneous retrieval of surface atmospheric parameters: A physical and analytically direct approach, *Advances in Remote Sensing Retrieval methods*, Deepack Publishing, Hampton, VA, 1985, 221~232.
- 40 黎光清, 东亚地区气象参数同步物理反演方法的数值试验: SPRMH 和 ISPRM, 大气科学, 1985, **17** (4), 133~142.
- 41 Li Guangqing, Study of the Simultaneous Physical Retrieval Method for Meteorological Parameters over the Continental Plateau of China, *Adv. Atmos. Sci.*, 1994, **11** (3), 151~165.
- 42 Li Guangqing, The study of retrieval theory and methods from satellite remote sensing for meteorological parameters over eastern Asia-Part I: Isprm and Srrm, *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, **14** (3), 203~213.
- 43 Kaplan, L., M. T. Cahine, and J. Susskind, Spectral band passes for a high precision satellite sounder, *Appl. Opt.*, 1977, **16** (2), 322~325.
- 44 赵高祥, 改进温度反演精度和垂直分辨率的一个可能的途径, 科学通报, 1980, **25** (23), 1079~1083.
- 45 Li Wei, and Lu Daren, Preliminary results of atmospheric turbulence observation with Xianghe mst/st radar, *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, **12** (4), 394~399.
- 46 周秀骥、黄润恒、吕达仁, 一类遥感探测方程界的理论分析, 大气探测问题的研究, 北京: 科学出版社, 1977, 1~11.
- 47 周秀骥、黄润恒、吕达仁, 微波探测大气温度分布的一个数值试验, 大气探测问题的研究, 北京: 科学出版社, 1977, 12~24.
- 48 黄润恒, 微波空对地遥感水汽分布的可能性及反演方法, 大气科学, 1981, **5** (4), 349~358.
- 49 Xue Yongkang, Huang Runheng, and Zhou Xiuji, Appliation of Monte-Carlo method to remote sensing of humidity profile by atmospheric microwave emission, *Scientia Sinica* (B), 1982, **25** (6), 646~657.
- 50 周秀骥, 大气微波辐射起伏及其遥感, 大气科学, 1980, **4** (4), 293~299.
- 51 Atlas D., C. W. Ulbrich, and R. Meneghini, The multiparameter measurement of rainfall Radio, *Science*, 1984, **19** (1), 3~22.
- 52 Meneghini, R., H. Kumagai, J. R. Wang et al, Microphysical retrievals over stratiform rain using measurements from an airborne dual wavelength radar-radiometer, *IEEE Trams.*, 1997, **35** (3), 487~506.
- 53 林海、魏重、吕达仁, 雨滴的微波辐射特征, 大气科学, 1981, **5** (2), 188~197.
- 54 黄润恒, 微波空对地遥感水汽分布的可能性及反演方法, 大气科学, 1981, **5** (4), 349~358.
- 55 魏重、林海、忻妙新, 8.6 毫米和 3.2 厘米两个波长地面辐射计探测云中含水量, 大气科学, 1982, **6** (2), 195~202.
- 56 忻妙新、林海, 8 毫米雷达和微波辐射计联合系统探测层状云中含水量分布的原理研究, 气象学报, 1983, **41** (1), 121~127.
- 57 薛永康、林海, 地对空微波遥感温度水汽廓线的联合求解, 气象学报, 1984, **42** (4), 423~430.
- 58 林海、忻妙新、魏重等, 雷达和微波辐射计联合系统探测云中含水量和雨强分布的研究, 大气科学, 1984, **8** (3), 332~340.
- 59 魏重、薛永康、朱晓明等, Determination of atmospheric precipitable water and humidity profiles by a ground-based 1.35mm radiometer, *Adv. Atmos. Sci.*, 1984, **1** (1), 119~127.
- 60 黄润恒, 魏重, 地面 1.35 厘米辐射计系统实时遥感分层水汽总量的实验研究, 大气科学 1986, **10** (3), 232~239.
- 61 魏重、王普才、宣越健等, 西太平洋热带海域水汽和云中液态水含量的统计特征, 大气科学, 1989, **13** (2), 197~203.
- 62 王普才、忻妙新、魏重等, 西太平洋热带海域的水汽和云的变化特性, 大气科学, 1991, **15**, 11~17.
- 63 吕达仁、魏重、忻妙新等, 地基微波遥感大气水汽总量的普适性回归反演, 大气科学, 1993, **17** (6), 721~

731.

- 64 Wei Chong, and Lu Daren, An Universal Regression Retrieval Method of the Ground-based Microwave Remote Sensing of Precipitable Water Vapor and Path, Integrated Cloud Liquid Water Content, *Atmospheric Research*, 1994, **34**, 309~322.
- 65 Bian Jianchun, Chen Hongbin, Yang Peicai et al., Retrievals of over-ocean precipitable water from SSM/I by SOM network model, *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**, 1038~1041.
- 66 Bian Jianchun, Chen Hongbin, Sun Haibin et al., Retrievals of Rain-Rate over Oceans from SSM/I Data Using SOM Model, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (3), 355~360.
- 67 Lu Daren, Sun Haibing, Bian Jianchun et al., New methods for retrieval of rainfall rate over ocean with SSM/I data, *Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment*, Spie proceedings series, 1998, 3503, 102~107 (Invited paper) .
- 68 Chen Hongbin, Sun Haibing, Wang Pucai and Lu Daren, Retrieving over-ocean precipitable water from the ssm/i measurements with several regression algorithms, *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, **12** (4), 443~449.
- 69 陈洪滨、王普才、孙海冰等, 从 SSM/I 亮温反演海洋上大气可降水量, 遥感技术与应用, 1998, **13** (1), 1~7.
- 70 林龙福、吕达仁、刘锦丽等, 不同侧边界条件下水平有限降水云的微波辐射模式研究, 大气科学, 1994, **18** (16), 729~738.
- 71 Liu Jinli, Zhang Ling, Lu Daren, Numerical Study of Remote Sensing of Cloud liquid Water Content by Spaceborne Combined Radar-Radiometer, *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, **12** (4), 435~4421.
- 72 刘锦丽、窦贤康、张凌等, 降水分布的空基遥感, 遥感与技术应用, 1999, **14** (4), 1~7.
- 73 Cui Zhehu, Liu Jinli, Chen Minghu et al., A study of microwave radiative transfer characteristics in stratified precipitating cloud by combined stratified cloud model and microwave, *Radiative Transfer Model*, 2003, **17** (1), 105~115.
- 74 陈洪滨、吕达仁、刘锦丽, 微波高度计测高的大气订正新算法, 大气科学, 1995, **19** (3), 339~346.
- 75 陈洪滨、吕达仁、魏重等, 空基微波辐射计遥感晴天大气可降水量: 不同通道组合和亮温函数形式的效果的比较分析, 大气科学, 1996, **20** (6), 757~762.
- 76 陈洪滨, 星载微波辐射计遥感反演云水量的一个算式, 遥感学报, 2000, **4** (3), 165~171.
- 77 陈洪滨, 测量云液水柱含量的一个设想, 大气科学, 2002, **26** (5), 695~701.
- 78 李成才、毛节泰、李建国等, GPS 遥感水汽总量, 科学通报, 1999, **3**, 333~336.
- 79 王小亚、朱文耀、严豪健等, 地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果, 大气科学, 1999, **23**, 605~612.
- 80 梁丰、李成才, 应用区域地基全球定位系统观测分析北京地区大气总水汽量, 大气科学, 2003, **2**, 236~244.
- 81 Li Shuyong, and Wang Bin, The time-saving numerical method for GPS/MET observation operator, *Progress in Natural Science*, 2001, **11** (12), 924~930.
- 82 中国科学院大气物理研究所, 激光在气象探测中的应用, 中国科学院大气物理研究所专刊 (第 1 号), 周秀骥主编, 北京: 科学出版社, 1973.
- 83 邱金桓、吕达仁、陈洪滨等, 现代大气物理学研究进展, 大气科学, 2003, **27** (4), 639~663.
- 84 吕达仁、魏重、张建国等, 激光探测大气湍流的实验研究, 中国科学院大气物理研究所专刊 (第 5 号) ——大气遥感探测问题的研究 (一), 北京: 科学出版社, 1977.
- 85 吕达仁、陈洪滨, 平流层和中层大气研究的进展, 大气科学, 2003, **27** (4), 761~781.
- 86 吕达仁、周秀骥、邱金桓, 消光一小角散射综合遥感气溶胶谱分布的原理和数值试验, 中国科学, 1981, **12**, 1516~1523.
- 87 Qiu Jinhuan, and Zhou Xiuji, Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance—Part I: Theory, *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3** (2), 162~171.
- 88 Qiu Jinhuan, A method to determine atmospheric aerosol optical depth using total direct solar radiation, *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**, 734~758.

- 89 Luo Yunfeng, Lu Daren, Zhou Xiuji et al., Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years, *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D13), 14501~14513.
- 90 Lu Daren and Duan Minzheng, Strategy of simultaneous remote sensing of aerosol optical depth and surface reflectance with space-borne spectrometry, *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds*, SPIE proceedings series, 3501, 2~11 (Invited paper) .
- 91 Qiu Jinhuan, A method for spaceborne synthetic remote sensing of aerosol optical depth and vegetation reflectance, *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, **15** (1), 17~30.
- 92 毛节泰、李成才, MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比, *应用气象学报*, 2002, 增刊, 26~34.
- 93 吕达仁、吴北婴, 激光闪烁相关法测雨遥感方程, *科学通报*, 1984, **29** (17), 1056~1959.
- 94 Wu Beiyong, and Lu Daren, Remote sensing of rainfall parameters by laser scintillation method-complete equation and numerical simulation, *Adv. Atmos. Sci.*, 1984, **1** (1), 19~29.
- 95 Wu Beiyong, and Lu Daren, Remote sensing of rainfall parameters by laser scintillation method (2) -numerical simulation of the retrieving, *Adv. Atmos. Sci.*, 1985, **2** (3), 325~333.
- 96 Wang Kaixiang, and Lu Daren, Remote Sensing of Rainfall Parameters by Laser scintillation Correlation-Experiment and Analysis, *Acta Meteorologica Sinica*, 1991, **5** (3), 342~351.
- 97 黄润恒, 利用激光闪烁测风的设想, *大气科学*, 1977, (1), 44~49.
- 98 吕达仁、霍娟、陈英等, 地基全天空成像辐射仪遥感的科学、技术问题和初步试验, *中国遥感奋进创新 20 年*, 童庆禧主编, 北京: 气象出版社, 2001, 114~120.
- 99 霍娟、吕达仁, 全天空数字相机观测云量初步研究, *南京气象学院学报*, 2002, **25** (2), 241~246.
- 100 Xie Xingsheng, Tao Shanchang, and Zhou Xiuji, Comparing experiments of digital photography visiometer, *Optical Remote sensing of the Atmosphere and Clouds*, J. Wang, B. Wu, T. Ogawa ed., SPIE proc., V. 3501, 150~154.
- 101 魏鼎文, Götz 逆转效应中 $I_{3112\text{\AA}}$ 的有效散射高度上升过程的跳跃性及逆转方法 B 解的不唯一性, *地球物理学报*, 1962, **11** (2), 115~120.
- 102 魏鼎文、林启锦, 测量大气臭氧垂直分布的逆转方法 (C) -对逆转方法 (A) (B) 的改进, *地球物理学报*, 1964, **13** (4), 276~283.
- 103 Li Jun, and Lu Daren, Non-linear retrieval of atmospheric ozone profile from solar backscatter ultraviolet measurements; theory and simulation, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14** (4), 473~480.

An Overview on the Research Progress of Atmospheric Remote Sensing and Satellite Meteorology in China

Lu Daren, Wang Pucai, Qiu Jinhuan, and Tao Shiyan

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract Atmospheric remote sensing is the technological basis and one of the fast developing disciplines in atmospheric sciences since the 1960s. Chinese scientists have made significant progresses in this field in both to fulfill the national needs of global and regional atmospheric parameters for meteorology, environment, and national defense applications, as well as to advance scientific frontiers. In this paper, we will briefly review the early history and recent developments of this field in China, in particular within the Institute of Atmospheric Physics. The main topics are as follows; early history of atmospheric remote sensing research; early history of satellite meteorology; basic research of satellite infrared remote sensing; theoretical and experimental research of atmospheric microwave remote sensing; atmospheric lidar remote sensing; atmospheric remote sensing.

Key words: satellite meteorology; infrared remote sensing; microwave remote sensing; lidar remote sensing; optical remote sensing