

大气遥感研究的进展

周 秀 骥

(中国科学院大气物理研究所)

大气遥感是六十年代全面兴起的新型大气探测方法。它的发展将为掌握大气运动和变化规律提供更丰富、更深刻的观测资料,是推动近代大气科学研究进步的重要工具。早在六十年代中期,如何把空间、激光、红外和微波等近代技术迅速应用到我国大气科学研究,建立新的大气探测系统,适应气象为我国国防与国民经济现代化建设服务的实际需要,促进我国大气科学赶超世界先进水平的问题,就引起了我国著名地球物理学家赵九章和气象学家顾震潮的密切注意,并且着手组织力量,制定发展大气遥感的研究规划。从1965年到现在,在党的领导下,我们努力排除并克服了各种干扰和困难,全面开展了激光、红外、声波和微波大气遥感等几个主要领域的研究工作,逐步形成一支大气遥感的研究力量,取得了一批科研成果。本文主要综合介绍激光、红外和微波大气遥感方面研究工作的进展,关于声波遥感和雷达探测方面的情况请参看本期其他文章,这里不再重述。

一、激光大气遥感

1966年底,在中国科学院上海光机所大力协助下,我所研制成了我国第一台大型红宝石激光气象雷达(见图1)^[1]。雷达的发射能量达1焦耳,光脉冲宽度为25毫微秒,重复频率达5次/分,接收孔径为100毫米,其性能和当时美国的气象光雷达水平大致相当。其后,在红宝石铬离子浓度与激光输出效率,隐花菁染料调Q稳定性等方面又做了比较系统的激光物理理论与实验研究工作^{[1]~[3]}。在此基础上,把红宝石激光器输出效率提高了四倍。在输出能量基本保持不变的条件下,工作物质体积压缩了近八倍,因而研制成了适用于野外流动观测的大功率小型激光气象雷达(见图2)。多年来,利用这两套激光气象雷达探测系统,我们对云层高度和层次、低层大气光学性质、水平和斜视能见度与大气污



图1 大型激光气象雷达

染扩散等大气遥感探测进行了多方面的工作。

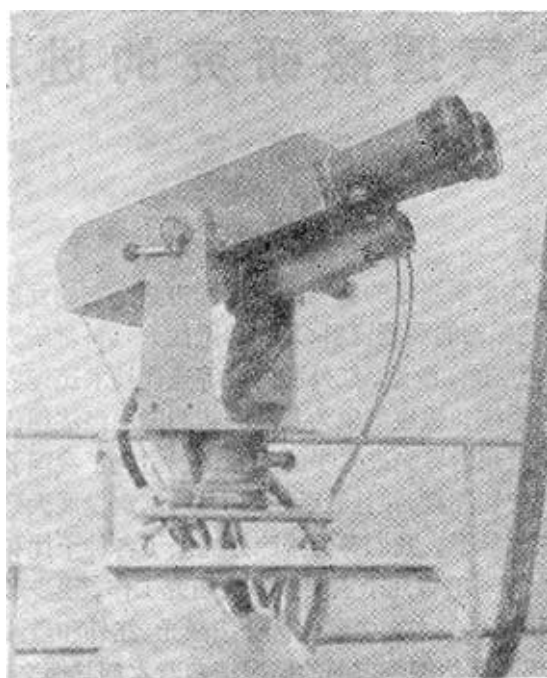


图 2 大功率小型激光气象雷达

首先,我们用激光测云高与双经纬仪基线法测量气球入云高度作对比观测^[4],充分肯定了激光测云的可靠性与优越性。在低层大气消光系数方面,我们在北京地区做了三年多的系统激光探测。^[5]于 1975 年,还同时配合了太阳可见光谱的大气透明度观测。^[6]这些观测结果表明,低层 3 公里以下的大气物理结构对决定整层大气光学特性占有极为重要的地位。通常国外所用的 Elterman 大气可见光模式在大多数情况下对低层大气并不适用。用地面水平能见度这个单一因子作为低层大气光学特性的判据是不充分的,还必须考虑到近地面层大气温度层结结构。此外,由于激光气象雷达提供了对大气消光系数分布进行几乎连续观测的可能性,取得了大气消光系数起伏与波动的观测资料,并对大气消光系数起伏的空间和时间结构函数探测做了初步的原理试验,^[7]这个试验结果表明,通过大气消光系数的激光探测,有可能分析出大气波动和湍流运动结构的信息。

激光气象雷达遥感探测大气水平与斜视能见度具有很大的实用意义。为此,我们进行了一些探索。在分析了三年内的激光探测和目测能见度对比的基础上,证明了由红宝石激光气象雷达所测定的大气消光系数 σ_0 与目测水平能见度之间有很好的相关,^[8]基本上满足下式

$$R(\text{公里}) = \frac{3.4}{\sigma_0(\text{公里}^{-1})}$$

斜视能见度的探测要复杂一些。我们设计了一个激光探测斜视能见度的具体方案,并于 1977 年在机场与飞行员目测斜视能见度值相比较,进行了初步原理性试验^[9]。结果表明,用激光气象雷达测定的斜视能见度值和飞行员目测值之间的相关系数达到 0.89。这

个试验还将继续进行。

值得指出的是,当水平能见度小于 1 公里时,观测事实表明,还必须考虑到二次大气散射效应对雷达回波的影响。为此,我们推导了考虑二次散射效应的光雷达方程,并提出了一个激光探测低能见度的原理^[10]。

从 1969 年开始,我们利用激光气象雷达进行了探测人工烟团浓度与大气污染扩散的研究。在实验室条件下,取得了激光雷达回波强度与人工烟团浓度之间定量关系的结果,证明可以可靠而快速地测定 10^4 — 10^7 个/厘米³ 范围内人工烟云的粒子浓度^[11]。几年来,应用这一激光测烟方法,为研究山区污染扩散规律提供了有效成果^[12]。

对于工业厂区排放污染物扩散规律的研究,我们还提出了一个实用而有效的激光探测自然烟羽相对浓度空间分布及污染物扩散系数的新方法^[13-14]。根据这个方法,在烟粒形状任意和折射率、粒子谱分布稳定的条件下,可以从激光回波中,分析出烟羽相对浓度分布与扩散系数等参数。最后,对烟、尘郁积层的激光探测,也做了初步探讨^[15]。

当前,为促进激光大气遥感的发展,必须研制新型激光气象雷达和解决雷达回波信息处理自动化技术,扩展激光大气遥感在大气科学中的应用,这也是我们目前的任务。

二、红外大气遥感

红外大气遥感是近代气象卫星探测中应用最广泛的一种方法。自 1970 年以来,我们系统地开展了红外大气遥感的理论与实验研究。首先,作为红外大气遥感的基础,我们进行了大气红外光谱的理论和大气透过率的计算研究^[16,17,18]。最先在计算大气 CO₂ 透过率时,采用了艾尔萨斯带模型并考虑到弱谱线吸收订正和 Q 支谱线吸收订正,汇编了完整的函数表。其后,根据最新吸收谱线结构资料,通过了精确的逐线计算方法,取得 15 微米 CO₂ 吸收带高分辨 (0.1 厘米⁻¹) 大气透过率的计算结果^[19]。

在大气红外遥感探测理论方面,系统而严谨地讨论了两类典型问题——气温遥感和大气成份遥感——频谱法和扫描法所对应的遥感方程的适定性问题^[20-21]。首先证明了扫描法遥感方程解的存在、唯一和解对观测误差的稳定性。这对从卫星上遥感平流层臭氧等大气成分探测具有重要的理论意义。其次,在频谱法红外遥感大气温度廓线的通道选择和反演方法的理论研究也比较完整而深入,提出了非线性迭代反演方法,反演结果比 Chahine 迭代方法有所改进。当然,由于我们还缺乏卫星等实际观测资料,只能结合我国北京、上海、广州等地区探空资料来进行反演的数值试验^[18,22]并且根据这些数值试验结果,选出了几组适用于卫星遥感大气温度廓线的通道。这几组通道的特点是通道数目少,只有四个到六个。同时,通道宽度比较大,其中有三组的波数宽度为 5 厘米⁻¹,另一组达 20 厘米⁻¹。其优点是便于技术上实现,而数值试验的反演结果并不低于当前水平。

在卫星红外遥感大气水汽廓线的研究中,我们指出了它和大气温度廓线遥感的根本区别^[20,23],在等温大气中不可能用红外遥感方法测得大气水汽含量。此外,通过求一阶变分,引进了“最佳信息层”的概念。从这个概念出发的分析表明,在有地表红外辐射参与的影响下,单靠卫星红外大气遥感,不可能给出对流层低层大气水汽的信息。因此,企图用类似遥感大气温度分布的“有效辐射层”概念,挑选更透明的红外通道来探测低层大气

水汽,是不会得到成效的。“最佳信息层”的概念还为卫星红外遥感水汽总含量与垂直分布的探测通道选择提供了正确的途径,在此基础上,我们给出了水汽分布的一些反演方法与数值试验结果^[18]。

随着气象卫星、海洋卫星、资源卫星、侦察卫星等空间技术的迅速发展与广泛应用,8—13微米大气红外窗区透过率的研究愈来愈引起国内外注意。从1972年以来,红外窗区大气衰减的物理机制和实际大气衰减系数的理论与观测分析研究也成为我们的重要课题之一。我们先后在北京平原地区以及拉萨、甘巴拉等海拔3700米和5500米高原地区,进行了几年的可见光波段和红外波段大气透过率的观测分析研究^[24-25]。采用的观测仪器是干涉滤光片或太阳光光谱光度计,单色计和红外分光光度计等。综合我们的观测结果,在北京地区,即使地面水平能见度高达30公里的晴空,在8—13微米红外窗区内,整层大气垂直透过率随波长的变化平均在0.73—0.80之间。而在海拔3700米的拉萨,在同一红外波段范围内,整层大气垂直透过率随波长的变化,其平均值也只有0.75—0.87。通过观测资料结合理论计算的分析,初步阐明大气气溶胶粒子、水汽远翼吸收以及双水缔合分子 $[(\text{H}_2\text{O})_2]$ 都是引起红外窗区大气衰减的重要因子。我们设想了“准线性氢键开结构”的双水缔合分子模式,用半经验方法,计算了双水缔合分子一个转动-振动带的吸收线参量,以及它在550—750厘米⁻¹波数范围内的吸收系数^[26]。计算结果较以往更为接近实验结果。目前,正进一步对气溶胶粒子的衰减作用作更深入的理论分析。

为了广泛满足各方面实际应用的需要,我们利用现有红外窗区大气光学模式,系统地汇编了红外窗区大气透过率的传输资料^[27]。同时在国家海洋局天津海洋仪器研究所的密切合作下,又进行了利用红外辐射计遥感海面温度的飞机观测试验,提出一个利用大气辐射传输方程订正大气衰减的方法,取得较满意的结果^[28]。这个结果还将进一步推广应用于卫星遥感海面温度的大气衰减订正。

为了促进我们红外大气遥感研究的发展,今后还必须在充分设法利用气象卫星的实际观测资料的同时,加强我们的野外观测实验以及实验室内大气光学模拟的研究工作,以使理论与实验更好地结合起来。

三、微波大气遥感

近十年来,我国微波大气遥感研究有了相当发展。由于《711》三公分微波雷达已经普及到各省气象台,五公分微波雷达也正在装备气象业务部门。所以,雷达气象研究已受到广泛重视。南京大学气象系对《711》雷达测不同雨强降水的能力做了有实用价值的定量分析^[29]。中央气象局研究所对三公分和五公分波段雷达的测雨能力进行了比较试验,并且通过和雨滴谱实际观测的结果相对比,求出北京、湖南等地雷达回波功率与降水强度之间的比较稳定的平均关系^[30]。在基础理论方面,北京大学地球物理系对雷达回波信号起伏相关和谱结构的研究引人注意。其结果说明,根据雷达回波信号的统计分析,有可能获得云和降水中滴谱、气流和湍流等重要参数的信息^[31]。我所雷达组计算了球形雨滴和冰雹对五种波长(0.86, 3.2, 5.6, 10.7, 17.6厘米)微波的后向散射截面、衰减截面和吸收截面^[32],为实际应用提供了基础资料。

除了主动式微波雷达探测的研究以外,1972年北京大学地球物理系与上海气象仪器厂和北京768厂等单位合作,初次研制成了我国第一台五毫米单通道微波辐射计^[33],并用扫角法取得了遥感10公里以下晴空大气温度层结的观测结果,五公里以下的探测均方根误差为2—3°K,五公里以上的误差要大些。目前,对遥感云下大气温度层结也有了新的进展。其后,我所又开展了微波辐射计遥感降雨的研究工作。根据我国北京、新疆天山以及庐山等地的雨滴谱观测资料,我们系统地进行了整理并计算了降雨的微波辐射特征,证明降雨微波辐射强度与降雨强度之间的关系很少依赖于雨滴谱形,比雷达回波强度与降雨强度之间的关系更加稳定。根据这个原理,我们于1976年研制成了3.2厘米微波辐射计(见图3),并开展降雨的微波辐射的观测分析。通过与北京地区雨量站网实测雨强资料的对比试验,初步证实了利用微波辐射计遥感百公里范围内区域性总降雨量的可行性与有效性^[34]。目前,一个微波雷达-微波辐射计联合探测原理^[35]和技术系统正在研究试制,预计它可能是取得云中含水量与降雨强度分布定量资料的有效探测手段。

在卫星微波大气遥感方面,我国也开始了系统的理论研究^[36—37]。由于我们引进了空间滤波器的概念,更加深刻地认识了大气遥感方程反演解不稳定性的物理本质,以及遥感方程误差、核函数与反演解空间分辨率之间的关系。根据这个理论分析,我们提出了一个比较稳定的反演最优化的方法。这个方法应用于微波遥感大气温度分布的数值试验是比较成功的。最初,我们选择了五毫米吸收带卫星遥感大气温度分布的八个最优化通道。数值试验表明,它们对遥感从地面直到20公里之间的大气温度分布是很有效的。以后,又



图3 三公分微波辐射计

进一步把通道数目减少为五个,数值试验也给出不错的反演结果^[38]。特别是证明了最优化核函数与地表辐射特征几乎无关,选定的一组通道适用于各种地表上空的大气温度分布遥感。

卫星微波遥感大气水汽分布还是个比较困难而没有完全解决的问题。我们对此做了

初步的理论分析^[39]。目前正在试验我们所提出的一些探测原理与反演方法。此外,对利用大气微波辐射起伏统计特征来遥感大气温度结构函数和风的垂直分布问题,我们也取得了初步的理论结果^[39]。

以上介绍的,是我国近十多年来在大气遥感研究方面一些主要进展的概貌。我们确实取得了不少成绩,但必须承认,和世界先进水平相比,还存在不小的差距。特别是还有一些重要的空白需要填补。例如大气风和湍流等动力学参数的遥感探测,国外有很大进展,问题也十分重要。虽然,我们在利用光闪烁效应遥感探测大气折射率结构常数和风的垂直分布的研究上,曾经提出一个更为有效的探测原理,并且取得数值试验的成功结果^[40]。此后,又将此方法推广到球面波情况,提出了一个激光闪烁测风的设想^[41]。但是限于国内技术条件,我们还未能进行观测实验验证,因此,为了我国大气遥感研究今后更大、更快地发展,我们还要作极大的努力。特别是要采取一些有效措施,加强用各种新技术来装备我们的大气遥感研究,改变目前观测实验研究极其薄弱的状况,使我国大气遥感研究在理论和实验密切结合的基础上更加扎实、更加迅速地前进。

参 考 文 献

- [1] 激光气象探测仪,中国科学院大气物理所集刊第1号《激光在气象探测中的应用》,1973年。
- [2] 赵燕曾、伍少明、金惠淑、谢威光等,隐花菁染料调Q的理论实验研究(待发表)。
- [3] 伍少明、赵燕曾,铬离子浓度与红宝石器件阈值和输出能量的关系(待发表)。
- [4] 激光测云,中国科学院大气物理所集刊第1号《激光在气象探测中的应用》,1973年。
- [5] 吕达仁、魏重、林海等,低层大气消光系数分布的激光探测,大气科学,1977, No. 3。
- [6] 林海、魏重,北京地区太阳可见光辐射与大气透明度的初步测量,大气科学,1976, No. 2。
- [7] 吕达仁、魏重、张建国、包玲明,激光探测大气湍流的实验研究,中国科学院大气物理所集刊第5号《大气遥感探测问题的研究(一)》,科学出版社,1977年。
- [8] 吕达仁、魏重、张建国,激光探测能见度的实验研究,大气科学,1976, No. 1。
- [9] 赵燕曾、陶丽君、郝南军,激光探测斜视能见度的初步原理试验。(待发表)。
- [10] 吕达仁,考虑二次散射的激光雷达探测低能见度问题(待发表)。
- [11] 激光测烟,中国科学院大气物理所集刊第1号《激光在气象探测中的应用》,1973年。
- [12] 中国科学院大气物理研究所著,山区空气污染与气象,1978年。
- [13] 孙景群、陶丽君、伍少明,激光测烟烟羽浓度,中国科学院大气物理所集刊第5号《大气遥感探测问题的研究(一)》,1977年。
- [14] 孙景群、金惠淑、胡裕良,激光探测大气扩散参数,大气科学,1977, No. 1。
- [15] 孙景群、杨明、烟、尘郁积层的激光探测,大气科学,1977, No. 2。
- [16] 黄荣辉等,二氧化碳红外吸收带透过率的计算,大气科学,1977, No. 3。
- [17] 刘瑞芝,CO₂谱线强度公式中系数的计算,《气象卫星的红外遥测及反演(一)》,1977年。
- [18] 气象卫星的红外遥测及反演(二),中国科学院大气物理研究所,1979年。
- [19] 赵高祥,CO₂ 15微米吸收带大气透过率的计算(待发表)。
- [20] 曾庆存著,大气红外遥测原理,科学出版社,1973。
- [21] 曾庆存,大气红外遥感探测的一些理论问题,中国科学,1978, No. 5。
- [22] 中国科学院大气物理所,气象卫星的红外遥测及反演(一),1977年。
- [23] 李崇银、张道民、曾庆存,关于大气湿度垂直分布的红外遥测,大气科学,1976, No. 1。
- [24] 一室103组,8—14微米红外辐射大气衰减的研究,中国科学院大气物理所集刊第5号《大气遥感探测问题的研究(一)》,1977年。
- [25] 王庚辰、许黎、吕位秀、任丽新,高山地区太阳可见光辐射大气消光系数的观测研究(待发表)。
- [26] 王明星,双水缔合分子[(H₂O)₂]和它对大气红外窗区的衰减作用,大气科学,1979, No. 1。
- [27] 中国科学院大气物理所编,3—5微米及7—14微米窗区红外辐射在大气中的透过程,1977年。
- [28] 周凤仙、任丽新、赵高祥、孔琴心,大气对红外窗区遥感的影响,大气科学,1978, No. 2。
- [29] 庄荫模、徐玉貌,《711》雷达测雨能力的分析,大气科学,1977, No. 4。
- [30] 中央气象局研究所,雷达气象文集,1977年。

- [31] 李其琛, 潘乃先, 雷达信号的相关分析和谱分析, 大气科学, 1979, No. 1.
- [32] 中国科学院大气物理研究所雷达组编, 球形雨滴和冰雹的微波散射函数表, 1978 年.
- [33] 赵柏林、王义举、邵根金等, 微波遥感大气温度层结的原理与试验, 大气科学, 1978, No. 4.
- [34] 大气物理所 105 组, 地面微波辐射计与测定区域性降水的初步试验, 大气科学, 1978, No. 4.
- [35] 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(待发表).
- [36] 周秀骥、黄润恒、吕达仁, 一类遥感探测方程介的理论分析, 中国科学院大气物理所集刊第 5 号《大气遥感探测问题的研究(一)》, 1977 年.
- [37] 周秀骥、黄润恒、吕达仁, 微波探测大气湿度分布的一个数值试验, 中国科学院大气物理所集刊第 5 号《大气遥感探测问题的研究(一)》, 1977 年.
- [38] 黄润恒, 空对地微波遥感湿度分布的数值试验(待发表).
- [39] 周秀骥等编著, 大气微波辐射及其遥感原理, (待发表)科学出版社.
- [40] 黄润恒、吕达仁、周秀骥、包玲明, 利用光闪烁效应遥感大气折射率结构常数及风的分布的理论分析, 中国科学院大气物理所集刊第 5 号《大气遥感探测问题的研究(一)》, 1977 年.
- [41] 黄润恒, 利用激光闪烁测风的设想, 大气科学, 1977, No. 1.