

专题评述

激光大气遥感探测

孙景群 周诗健

(中国科学院大气物理研究所)

一、引言

用光学方法进行主动大气遥感探测,早在本世纪三十年代就有过这方面的尝试,当时用探照灯研究了直至28公里高度的大气浑浊度和分子散射^[1]。以后,还发展成脉冲光探照灯来探测大气^[2,3],并用弧光光源探测云底高度等。但是,利用这种非相干光源探测大气,受到光源性能的多方面限制,从而使得大气光学探测这一学科分支进展缓慢。

自1960年激光问世以后,由于这一新颖光源具有单色性好,相干性强、方向性高以及大能量、大功率等特点,立即受到各有关方面的重视,并获得广泛应用。1963年开始提出激光探测大气的种种设想^[4],几乎同时,也发表了利用红宝石脉冲激光雷达探测高层大气浑浊度^[5]和低层大气云、霾等方面^[6]的文章。我国自1965年以后,先后研制和生产了激光气象雷达和激光测云仪,并开展了一系列激光大气探测研究^[7]。国际上自1968年起,迄今已召开了八届激光大气探测的会议,每届均宣读上百篇有关论文。由此可见,激光这一新颖光源的出现,强有力地促进了大气光学探测的发展。

常用于大气探测的脉冲激光雷达,具有与微波气象雷达类似的探测原理。发射激光在大气中传播遇到大气分子以及诸如烟、尘、云雾之类的气溶胶时,将发生弹性散射、非弹性散射和吸收等物理过程,这些过程的主要参数见表1。其中后向散射部分被脉冲激光

表1 光与传输介质相互作用的典型截面

相互作用过程		散射元	波长关系	作用截面(厘米 ²)
弹性 散射	Rayleigh 散射	大气分子	$\lambda_s = \lambda_r$	10^{-32}
	Mie 散射	气溶胶粒子	$\lambda_s = \lambda_r$	$10^{-8} - 10^{-27}$
非弹性 散射	Raman 散射	分子	$\lambda_s < \lambda_r$	10^{-30}
	共振 Raman 散射	分子	$\lambda_s < \lambda_r$	$10^{-24} - 10^{-27}$
	共振散射	原子、分子	$\lambda_s = \lambda_r$	$10^{-14} - 10^{-23}$
	荧光	分子	$\lambda_s < \lambda_r$	$10^{-14} - 10^{-23}$
吸 收		原子、分子	$\lambda_s = \lambda_r$	$10^{-18} - 10^{-21}$

* λ_s 为发射波长, λ_r 为接收的散射波长

1978年4月14日收到。

雷达作为回波信号而接收,它包含强度、频率、相位、偏振等因子,成为激光大气探测的有效信息。

目前,激光在探测大气污染和大气成分,云雾、降水和能见度,大气温、湿、压、风等气象要素,以及高层大气等方面,都取得一定程度的进展。本文将概要介绍这些探测方法和部分结果,以及未来的发展动向。

二、激光大气探测

1. 激光探测大气污染

激光通过 Mie 散射可以遥测烟、尘,这时回波信号较强,它是激光雷达最广泛的一种应用。利用 Raman 散射法和吸收光谱法,激光可以遥测污染气体浓度和成分。故激光在大气污染监测、大气污染扩散规律的研究等方面具有重要地位。

根据脉冲激光的烟羽回波波形,可以探测化学烟幕和核爆炸烟羽的几何形状和空间位置^[6],工业烟羽的上升轨迹,以及烟羽回波强度的剖面分布^[7]。此外,由烟羽远、近边界处的大气激光回波,还可探测烟羽透明度^[8]。若将激光回波调制成亮度,则能获得类似于微波雷达的烟羽垂直剖面图象^[9]。

对于形状(或晶轴取向)任意,光学折射率和尺度谱分布稳定不变的特定人造示踪烟羽,通过实验预先测定烟粒的平均后向散射截面和散射截面,则由烟羽激光回波波形的分析计算,还能进一步定量探测烟羽浓度的时、空分布^[10]。对于满足相同条件的工业烟羽,则可获得烟羽相对浓度的时、空分布^[11]。

激光探测烟羽浓度,不仅可直观了解大气污染的扩散实况,而且由烟羽平均浓度的垂直剖面分布,还能获得对估算大气污染空间分布十分重要的大气扩散系数^[12]。

低层晴空大气的激光回波,主要是大气尘埃的贡献。分析激光回波波形,获得大气尘埃消光系数的分布,从而可得大气空间浑浊状况的时、空分布^[13]。

若大气尘埃的密度、光学折射率和尺度谱分布稳定且已知,则通过光散射理论,还能进一步求取大气尘埃浓度的分布^[14]。然而,这种理想的条件难于经常满足,因此也有采用发射和接收分设两地的激光探测系统,用多散射角的方法,进一步探测大气尘埃尺度谱等参量^[15]。还有利用多波长激光雷达探测大气尘埃谱分布的设想^[16]。不过由于技术和计算上的困难,如何用激光定量探测大气尘埃浓度分布,还有待于进一步探索。

激光探测烟、尘,不仅在控制大气污染方面能起监督作用,并为大气污染的预报提供依据。此外,还能用以研究大气污染的扩散规律,这对城市规划、山区厂矿的合理布局等方面具有实用价值。不过对于浓厚的烟羽和浑浊大气,激光的穿透深度受到限制,并因多次散射效应不可忽略而使问题复杂化。

激光探测污染气体浓度和成分,目前主要采用 Raman 散射法和吸收光谱法。

当入射光子使分子内能发生变化,由于分子的振、转效应而使散射波长发生偏移的现象叫 Raman 效应。如果我们接收这种散射信号,则频移量仅与探测气体的成分有关,回波强度仅与该气体浓度有关。Raman 散射法探测的优点是:不需要使用特定频率的激光器;可按 Raman 频移次序识别空气中的多种污染物;可将大气中含量稳定的 N_2 或 O_2 分

子的 Raman 回波强度作为参考信号以精确获得探测气体的绝对分子密度。Raman 散射法的最大缺点是探测灵敏度低。根据理论计算结果,一部分设计良好的 Raman 激光雷达,只能在夜间探测数百米远处几 ppm 的污染气体浓度,故一般只能在排放源附近进行探测,如探测高烟囱出口处的污染气体浓度。Hirschfeld 等人^[19]使用倍频红宝石激光器(3472 埃),在夜间测得 200 米处烟囱口的 SO_2 浓度为 30ppm。为了增加探测排放源浓度的机动性,日本在 1971 年建成第一台车载 Raman 激光雷达^[20]。

吸收光谱法是探测灵敏度较高的一种方法,它可以利用置于一定距离处的人工或自然合作目标,将激光信号反射后返回至接收系统,测出激光穿透路径上的平均污染浓度。如 O Shea 等人^[21],用氢离子激光器发射的波长配合 NO_2 的吸收线,通过 3 公里以外的角反射体的反射,可以监测城市上空固定方向上的 NO_2 ,可探测平均浓度为 0.013ppm,也可以利用气溶胶对脉冲激光的散射,进行有距离分辨率的探测,获得污染气体的空间分布。如 Roche 等人^[22]成功地利用脉冲染料调谐激光器,探测到 4 公里处 0.2ppm 的 NO_2 浓度,并获得厂区上空 NO_2 的平面分布图。

2. 激光探测气象要素

用激光探测湿、湿、压、风等气象要素来补充或代替常规的无线电探空仪法,一直是人们关注的问题。由于激光探测可以取得这些要素几乎同一时刻的空间分布廓线,并且可以频繁地测得它们的时间变化,这对于我们研究和了解大气中发生的许多过程有着重要的意义。

激光探测湿度和密度实际上属于大气成分的探测范畴,即探测大气水汽和含量比较稳定的 N_2 和 O_2 ,故较多地利用吸收光谱法和 Raman 散射法进行探测。

利用水汽在 6933—6944 埃之间的一些强吸收线, Schotland^[23]提出用压电陶瓷作为红宝石激光器谐振腔的反射镜的衬垫,进行发射波长的控制扫描,测得 1—2 公里高度的水汽廓线。此外还有人提出用水汽红外吸收带的吸收光谱法探测方案^[24,25]。Melfi^[26]则使用倍频红宝石激光器,第一个探测到水汽的 Raman 回波廓线,获得直到 1.5 公里高度的水汽分布,以后 Cooney^[27]利用同样方法,测得 3 公里高度的水汽廓线。

由于一般激光器没有适当的发射波长与 N_2 和 O_2 的吸收线相配合,所以目前常用 Raman 散射法探测大气的 N_2 和 O_2 ,并由此推求大气密度。Leonard^[28]使用脉冲氢分子激光器(3371 埃)第一个测到直至 1.2 公里高度处大气中 N_2 和 O_2 的 Raman 后向散射。Garvey^[29]已成功地取得了 40 公里高度上 N_2 的 Raman 回波,并由此推得大气密度。

在 30 公里以上,大气散射回波基本上由分子散射造成,其强度正比于大气密度,只要由探空资料给出某一参考高度上的密度值,就能直接由回波强度精确地算出高空密度分布。根据这一原理,利用红宝石激光雷达,已探测到直至 90 公里高度的大气密度分布^[30]。

激光探测温度和气压廓线,目前主要还是根据激光探测得到的大气密度廓线,以及给出某一参考高度上的温度或气压值,由大气静力学方程和状态方程推得。如 Strauch 等人^[31]用 Raman 激光雷达通过测密度来推求温度,结果良好。

激光直接探测湿、压,大多处于方案阶段,如根据原子或分子自然谱线的 Doppler 展宽和气压展宽来测温、压;根据气体分子的吸收截面与温度等因子有关;提出用三波长法

探测温度^[33];根据分子转动 Raman 散射截面与温度有关的原理来探测温度^[34],并已有初步结果^[35]。

激光遥感测风,可以利用随风飘移的气溶胶粒子作示踪物探测晴空大气风场,主要有 Doppler 测风、相关测风和闪烁测风等方法。

激光 Doppler 测风原理与激波 Doppler 雷达测风原理类似,但激光频率较高, Doppler 频移值也较大,故易获得较高的探测精度。如 Benedetti-Michelangeli 等^[36]利用脉宽约 1 微秒的氢离子激光器作发射源,不用外差探测法,而直接用球面共焦 Fabry-Perot 干涉仪检测 Doppler 频移,可测得 1 公里高度附近的风速径向分量,精度约 0.3 米/秒。此外也有用功率为 10 瓦的 CO₂ 激光 Doppler 雷达,探测 1 公里左右的龙卷风速^[37]。

激光相关测风是利用大气中存在的随风飘移的气溶胶的不均匀性,根据激光大气回波的时间和空间相关办法,推断出大气不均匀结构的移动,从而获得风场分布。例如,用红宝石脉冲激光雷达跟踪烟羽的移动,测定 400—600 米高度附近的风速分布^[38]。对于自然气溶胶,一般则需计算激光回波的相关系数来推断风场^[39]。

激光闪烁测风目前在测定探测空间的横向平均风速上已取得实际结果,并列入美国风暴试验计划,用来研究云下低层大气的气流辐合和辐散^[40]。例如,在一端放置氦氖激光器,在相距几百米至几公里的接收端,水平排列两相隔仅几毫米的接收器,激光在大气传输过程中因湍流作用而产生闪烁效应,由于存在横向风速分量,使两接收器所接收的激光闪烁信号具有相关性,由此推断探测路径上风速横向分量的平均结果^[41,42]。

激光探测湍流也有过一些尝试,是一个值得注意的方面^[43]。

3. 激光探测云雾、降水和能见度

激光可以探测云高和层次、云的不均匀结构和演变以及云的波动等,还能探测云滴谱和消光系数等微观量,以及降水强度的分布和能见度等。这对于研究云雾物理、大气动力学、人工影响天气、天气预报和航空飞行等方面都具有一定实际意义。但因激光在云雾、降水和恶劣能见度时的穿透能力较差,加上多次散射效应必须予以考虑,因而使激光探测受到限制。

测量脉冲激光到达云底和激光回波返回的时间,就可得出云底高度。激光不仅可以探测低、中、高云的云底高度,有时在薄云和有云隙的条件下,激光还能穿透云层,探测云厚和层次,甚至可以探测到肉眼不可见的高空卷云。

根据云雾激光回波波形的时、空变化,或等回波强度(已进行距离平方补偿)垂直剖面分布的变化^[44],可用以探测云雾不均匀结构、云雾增厚或消散等演变过程。根据云雾结构的变化,可以观测人工影响天气的效果^[45],还可探测积云的对流发展^[46],以及过山气流形成波状云等动力过程^[47]。

利用云雾激光回波,在云滴谱分布已知的条件下,可探测水云的消光系数,并进而获得含水量等云物理参数^[48]。根据冰晶比水滴对激光后向散射的退偏幅度大得多的特性,有可能根据云雾激光回波的退偏幅度,对冰云和水云进行辨别^[49]。

激光还能探测降雨强度,探测原理与微波雷达测雨相类似。由激光探测降水的消光系数,通过消光系数与雨强的经验公式推算出雨强分布^[50]。激光可以探测几公里范围内,分辨率仅几十米的雨强细致分布,这对研究降水过程和雷暴天气等都很有意义。

激光能够提供一种不需要目标物的、单点探测水平能见度的客观方法,还可能探测其它方法难以解决的斜视能见度问题,这时飞机着陆、海上航行等极为有用。

当观测目标物和背景的亮度已确定的条件下,能见度主要取决于大气透明度。水平大气平均消光系数的激光探测,主要采用斜率法和回波特征法。斜率法是根据光雷达方程,在大气水平平均一的假设下,由大气回波所构成的直线斜率,求取大气水平平均消光系数^[54]。回波特征法则是根据水平大气激光回波的半宽度和峰值距离等特征量与能见度的关系,求取大气水平平均消光系数^[54]。此外,利用连续激光的大气回波,探测大气水平平均消光系数,亦有所设想^[55]。

由于大气消光系数随高度变化,因此激光探测斜视能见度难度要大些。目前多根据探测大气尘埃消光系数空间分布的方法^[56],也有用多仰角法探测不同仰角下同一高度的大气回波,然后再采用斜率法求取各高度的水平大气平均消光系数^[54]。此外,还有用 Raman 散射探测大气消光系数,以消除能见度恶劣条件下多次散射的影响^[57]。

4. 激光探测高层大气

由地面激光遥感高层大气的性质是一种经济而又简便的方法。迄今,这方面很多工作是关于探测平流层中的气溶胶。研究气溶胶在平流层中的状况具有三重意义:一是它对辐射能量的传递有直接影响;二是它在平流层中发生的气相化学变化中可能起重要作用;三是它可作为观测平流层输送的示踪物。鉴于此,如美国海洋大气局,就利用夏威夷 Mauna Loa 高山观测台的红宝石激光雷达,从 1973 年以来一直监测平流层气溶胶的时空变化^[58],自 1977 年以后还准备配置染料激光器,并增加观测地点。

激光探测高层大气的信号非常微弱,因此它要求激光发射能量大、重复频率高、本机噪声小、接收面积大,并采取一定高度间隔累积量子计数的方法尽量提高信噪比。最典型的,也是目前世界上最强大的观测高层大气的激光雷达系统已在牙买加的金斯敦投入工作。它的红宝石激光发射能量为 10 焦耳,重复频率 10 次/分,由 36 个球面镜镶嵌而成的接收总面积为 16 米²^[59],这个系统在夜间工作的探测高度可达 100 公里。

根据高层大气激光回波的探测分析指出,在 20 公里高度附近,存在着气溶胶回波的极大值^[58],这也证实了平流层中 Junge 气溶胶层的存在。Russell 等人的观测发现,气溶胶层高度的变化与平流层增温时的垂直运动有关^[59]。他们还发现,自 1963 年印尼阿贡火山爆发后的第二年开始,南、北两半球上许多平流层激光探测结果都证实气溶胶层回波强度在逐年下降,并与球载粒子光电计数器、曙暮光光度计、以及机载粒子捕获器三种方法的探测结果进行比较,其下降趋势是一致的。但是 1977 年 10 月危地马拉费哥火山爆发后,世界各地激光探测又发现平流层中气溶胶剧增^[60,61]。这些观测事实说明,火山活动有可能是平流层气溶胶变化的主要原因,并对气候变化产生影响。

探测高层大气微量元素可利用共振散射,此时可避免低层大气分子密度大引起的碰撞淬灭效应。如 Na 原子,它的共振散射截面比分子散射截面要大 14 个量级。此法已用于探测 80—100 公里高度上的 Na 蒸汽,用 0.5896 微米发射波长的染料激光器^[62],不仅能测出 Na 的浓度,而且可以测出它的时、空变化,由此间接了解高层大气的运动^[63]。原则上共振散射法也可用来探测高空中存在的其它气体和蒸汽,如 K (0.7699 微米), Li (0.6708 微米), Ca (0.4226 微米)等,这些探测对解决高层大气的许多问题,诸如研究光化

学反应、激活态的气体浓度等,具有很大潜力。

与此同时也开展了不少机载激光雷达对平流层的探测和研究^[64,65]。由于气溶胶随主要的气象条件而发生系统的变化,所以机载激光雷达在大范围内的连续测量,将为研究平流层与对流层之间的交换过程提供有价值的工具。

三、结 语

综上所述,激光大气探测,由于发射波长在光波段(典型的约1微米),比微波波长(典型的约 10^4 微米)要小几个量级,而与烟、尘等大气气溶胶微粒尺度相当,加上光电探测器的灵敏度较高,因而激光探测这类气溶胶具有很高的灵敏度。即使对于尺度更小的大气分子,激光探测也能发挥作用。此外,激光脉宽约十几至几十毫微秒,发散角可控制在十分之几毫弧度内,因而激光探测具有米量级的空间分辨率,能够测得一些大气参量的空间精细结构。所以激光是一种颇有前途的主动遥感探测技术,尤其是在探测晴空大气方面更有其优越性。然而,由于大气(特别是云雾、降水)对激光的散射(和吸收)衰减强烈,则使激光大气探测的距离和穿透深度受到限制。

激光雷达综合了现代量子电子学、光学、自动化、精密机械、光学加工工艺等方面的成就,技术要求较高,因而使激光大气探测的发展和推广应用受到一定限制。十多年来,激光探测多数还处于原理试验阶段,正式投入实际使用的探测项目还为数不多。但从激光探测的现有能力和内在潜力来看,将会在气象上获得广泛应用。它对大气边界层气象的研究、空气污染气象学的研究、云雾微观特征及动力学研究、高层大气动力学和热辐射学的研究、以及对长年气候变迁的研究等方面,都能发挥独特的作用。

激光探测目前发展的现状有些类似于五十年代初期微波气象雷达发展的处境,因此,激光大气探测在气象学上的应用将成为基本发展方向。随着探测原理的深入研究和激光技术的日益发展,激光探测对气象科学发展的作用也与日俱增,其应用范围也日渐扩大,并将逐渐形成一门新的学科分支——激光气象学。

从激光大气散射回波中包含的强度、频率、相位、偏振诸因子的多种信息来看,目前大多数只利用了回波强度的信息,相应技术要求也较低,至于频率(如 Raman 效应)、相位(如 Doppler 效应)、偏振(如非球形粒子退偏)等因子的信息也陆续引起重视并加以利用,但相应技术要求较高,理论工作也要跟上。激光探测对象仍以大气气溶胶和大气分子为主,这是它的特长,故在怎样以激光探测表征气溶胶的种种特性、晴空风探测、气体成分和浓度探测等方面值得深入研究。其中 Raman 散射法和光谱吸收法是两种有潜力和前途的探测方法,值得我们加以重视。

激光大气探测在气象应用中,应与微波雷达、声雷达和红外探测等方法,进行综合遥感探测,以期彼此配合、相辅相成,获得更为丰富的大气探测信息。如 Derr^[66]进行了激光雷达和微波雷达测云的分析比较,指出了适合于各自探测的不同情况;Platt^[67]用激光雷达和红外辐射计同时观测,获得了关于云的光学性质方面有意义的资料;Hagard^[68]用激光雷达和声雷达同时观测逆温层等等。各种遥感系统的综合观测,正成为一个重要的发展方向。

随着激光大气探测研究的进展,星载激光雷达的探测研究近年来也很受重视。由于外层空间激光传输衰减小、卫星探测范围大,这些优点使星载激光探测成为引人注目的发展方向。如法国 Riviere 等人^[69]提出了星载激光雷达的设计;西德 Werner 等人^[70]为星载激光雷达进行飞机模拟实验。许多研究^[71-73]表明,星载激光雷达可以测云(云顶的空间变化、薄卷云分布等)、测气溶胶分布、测大气成分、微量元素等等。此外,如 Huffaker 等人^[74]还提出用星载脉冲相干激光雷达测全球风场,Smith 等人^[75]提出用星载激光雷达通过吸收光谱法测对流层的温、压廓线等。

星载激光探测不仅可弥补气象卫星被动遥感探测的种种不足,而且可以获得更为丰富的探测内容。预计八十年代将进行卫星激光遥感探测试验^[76]。可以期望,不久的将来,气象卫星将采用激光、微波等主动遥感探测系统与可见、红外和微波等被动遥感探测系统相结合的探测体系,获得全球更为丰富和精确的气象要素的空间分布,以满足大气科学研究和实际应用的需要。

激光大气探测的发展和推广应用,有赖于许多激光探测技术问题的解决,主要有以下三个方面。首先,要求解决激光器的变频技术。目前正在研究各种原理的调谐激光器,如果这种技术可以成熟使用的话,则基于吸收光谱法原理的探测方法将得到迅速发展(当然,还必须开展激光光谱学等方面的研究);如果可调波长范围宽广,则多波长探测方法也得到解决,这些将为激光探测打开广阔的前景。其次,要解决弱信号的检测技术。激光探测大气成分和高层大气等,往往接收的光信息十分微弱,而各种原因引起的噪声则强烈影响激光探测的精度。因此必须深入探讨如何通过技术措施和统计方法,获得低信噪比条件下的有效光信息。第三是激光探测自动控制和观测资料的自动数据处理。在某些较先进的激光雷达上,已实现了这种自动化^[76]。尤其是自动数据处理,它是激光探测能否推广使用的关键之一。应发展快速模数转换器(5兆赫以上),磁带记录和微小型计算机进行控制和数据处理,从而获得实时的观测结果。

参 考 资 料

- [1] E. O. Hulbert, *J. Opt. Soc. Amer.*, 1937, 27(11), p. 377.
- [2] S. S. Friedland et al., *J. Geophys. Res.*, 1956, 61(3), p. 415.
- [3] L. Elterman, AFCEL-69-0153 U. S. Air Force Cambridge Res. Lab. Bedford, Massachusetts, 1968.
- [4] G. G. Goyer et al., *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1963, 44(9), p. 564.
- [5] G. Fiocco et al., *Nature*, 1963, 199(4900), p. 1275.
- [6] M. G. H. Ligda, *Proc. of first Conf. on laser technol.*, 1963, p. 63.
- [7] 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集刊第1号, 1973, 科学出版社。
- [8] B. T. H. Collis et al., *PNE* 1119, 1968.
- [9] W. B. Johnson, *J. Appl. Meteorol.*, 1969, 8(3), p. 443.
- [10] C. S. Cook et al., *Appl. Opt.*, 1972, 11(8), p. 1742.
- [11] E. Schanda (Ed.), *Remote sensing for environmental sciences chap. 4*, 1976, Springer-Verlag.
- [12] 中国科学院大气物理研究所, 激光测烟, 出处同[7], p. 21.
- [13] 孙景群等, 激光测烟羽浓度, 大气遥感探测问题的研究(一), 中国科学院大气物理研究所集刊第5号, 1977, p. 59, 科学出版社。
- [14] 孙景群等, 激光探测大气扩散参数, 大气科学, 1977, 第1期, p. 36.
- [15] 孙景群, 激光测烟羽, 物理, 1975, 4(4), p. 204.
- [16] E. W. Barrett et al., *J. Appl. Meteorol.*, 1967, 6(3), p. 500.

- [17] J. A. Reagan et al., 14th Radar Meteorology Conference, 1970, p. 275.
- [18] G. Yamamoto et al., *Appl. Opt.*, 1969, 8(2), p. 447.
- [19] T. Hirschfeld et al., *Appl. Phys. Lett.*, 1973, 22(1), p. 38.
- [20] S. Nakahara et al., *Opto-Electronics*, 1972, 4, p. 169.
- [21] D. C. Oshea et al., *Appl. Opt.*, 1974, 13, p. 1481.
- [22] K. W. Rothe et al., *Appl. Phys.*, 1974, 4(2), p. 181.
- [23] R. M. Schottland, Some measurement of the spatial distribution of atmospheric water Vapor by means of a turnable pulsed Laser radar system, 3rd conf. on laser radar studies of the atmosphere—conf. Abstr., 1970.
- [24] G. B. Northam et al., A comparison of DIAL Systems for Vertical H₂O vapor profile measurements, 8th International laser radar conf., 1977.
- [25] E. V. Browell et al., Development and evaluation of a near-IR H₂O Vapor DIAL System, 出处同[24].
- [26] S. H. Melfi et al., *Phys. Lett.*, 1969 15, p. 295.
- [27] J. Cooney, In "Laser application in the Geosciences" (J. Gauger et al. Ed.) pp. 51—68 1970 Western Period Co. North Hollywood California.
- [28] D. A. Leonard, *Nature*, 1967, 216, p. 142.
- [29] M. Y. Garvey et al., 5th Conf. Laser radar studies atmos., 1973, p. 65.
- [30] G. S. Kent et al., *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1970, 32, p. 917.
- [31] R. G. Stranch et al., *Appl. Opt.*, 1971, 10(12), p. 2665.
- [32] E. D. Harris et al., AD 615444, 1965.
- [33] J. B. Mason, *Appl. Opt.* 1975, 14(1), p. 76.
- [34] J. Cooney, *J. Appl. Meteorol.*, 1972, 11, p. 108.
- [35] A. Cohen et al., 7th International Laser radar conf., 1975, p. 135.
- [36] G. Benedetti-Michelangeli et al., *J. Atmosph. Sci.*, 1972, 28(5), p. 906.
- [37] R. F. Abbey et al., 出处同 [35], p. 61.
- [38] J. D. Horn et al., 出处同 [17], p. 269.
- [39] E. W. Eloranta et al., *J. Appl. Meteorol.*, 1975, 14(8), p. 1485.
- [40] U. S. Department of Commerce, NOAA, ERL, June 1974, Project severe environmental storms and mesoscale experiment, pp. 1—77.
- [41] G. R. Ochs et al., *Appl. Opt.*, 1976, 15(2), p. 403.
- [42] 黄润恒, 利用激光闪烁测风的设想, 大气科学, 1977, 第1期, p.44.
- [43] 吕达仁等, 激光探测大气湍流的实验研究, 出处同[13], p.77.
- [44] W. Viezee et al., *J. Appl. Meteorol.*, 1969, 8(2), p. 274.
- [45] R. T. H. Collis et al., *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, p. 5104.
- [46] В. Д. Степаненко, Радиолокация в метеорологии, глава 6, 1973, Гидрометеоиздат.
- [47] R. T. H. Collis et al., *J. Appl. Meteorol.*, 1968, 7(2), p. 227.
- [48] Е. Г. Швидковский и др., Изв. АН СССР Сер. Физика атмосферы и океана, 1971, 7(4), p. 404.
- [49] F. S. Harris, *Appl. Opt.*, 1971, 10(4), p. 732.
- [50] S. T. Shipley et al., *J. Appl. Meteorol.*, 1974, 13(7), p. 800.
- [51] 吕达仁等, 激光探测能见度的实验研究, 大气科学, 1976, 第1期, p.55.
- [52] R. T. Brown, 13th Radar meteorology Conf. Proc., 1968, p. 524.
- [53] J. R. Lifshitz, AD 777533, 1974.
- [54] M. Kano, *Meteorol. and Geophys.*, 1968, 19 p. 121.
- [55] H. Herrmann et al., Alta frequenza, 1974, XLIII(9), pp. 732—735.
- [56] R. W. Fogley, 6th International Laser Radar Conf., 1974, p. 115.
- [57] G. S. Kent et al., *J. Appl. Meteorol.*, 1971, 10, p. 448.
- [58] M. P. McCormick, 8th International Laser Radar Conference (invited papers), 1977.
- [59] P. B. Russell et al., *Quart. J. R. Met. Soc.*, 1976, 102, p. 675.
- [60] M. P. McCormick et al., *Appl. Opt.*, 1975, 14, p. 4.
- [61] R. W. Legley et al., *Geophys. Res. Lett.*, 1975, 2, p. 139.
- [62] R. D. Hake et al., *J. Geophys. Res.*, 1972, 77(34), p. 6839.
- [63] B. R. Clemesha et al., 出处同 [56], p. 173.
- [64] J. I. Stanford, *J. Atmos. Sci.*, 1975, 32, p. 852.
- [65] F. G. Fernald et al., *J. Geophys. Res.*, 1977, 82, p. 433.

- [66] V. E. Derr, 出处同 [58],
- [67] C. M. R. Platt, *J. Atmos. Sci.*, 1973, 30, p. 1191.
- [68] A. Hagard, 出处同 [35], p. 68.
- [69] G. Riviere et al., lidar Concept for an early spacelab mission, 出处同 [24].
- [70] C. Werner, ASSESSII Lidar experiment, 出处同[24].
- [71] S. T. Shipley et al., NTIS Report N76-16597, 1975.
- [72] E. E. Ransberg et al., NASA CP2004, TUC4-1 to 4, 1976.
- [73] T. D. Wilkerson et al., Two-Color atmospheric lidar for space shuttle observations of molecular and aerosol backscatter, 出处同 [24]
- [74] R. M. Huffaker et al., Proc. of 7th conf. on Aerospace and Aeronautical Meteor., 1976.
- [75] W. L. Smith et al., A Laser method of observing surface pressure and pressure-altitude and temperature profiles of the troposphere from satellites, 出处同 [24]
- [76] E. E. Vthe et al., *Opt. Quan. Electro.*, 1975, 7(3), pp. 121—129.