

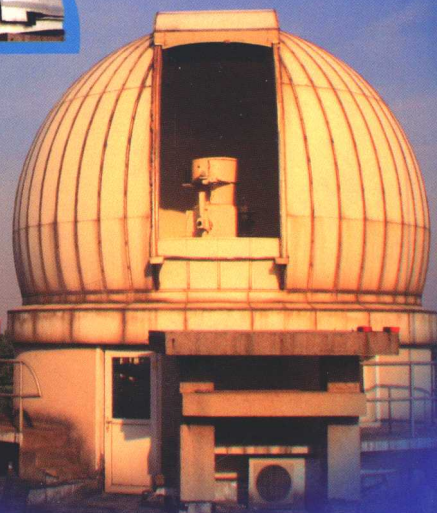


地球观测与导航技术丛书

激光雷达大气参数测量

——中国东部重要大气参数高分辨率垂直分布探查

王英俭 胡顺星 周 军 胡欢陵 等 著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

地球观测与导航技术丛书

激光雷达大气参数测量

——中国东部重要大气参数
高分辨率垂直分布探查

王英俭 胡顺星 周 军 胡欢陵 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍激光雷达大气探测技术和我国东部整层重要大气成分高分辨率垂直分布的探查结果,是中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所自20世纪90年代以来开展激光大气探测研究的成果总结。许多观测数据,尤其是长期连续数据是首次公开发表。本书分为四篇。第一篇叙述激光雷达探测大气参数的基本原理、数据处理方法和激光雷达研制的关键技术等。第二至四篇分别给出中国东部地区气象参数(温度、湿度和风场)、大气气溶胶和大气痕量气体(大气臭氧、二氧化碳、二氧化硫和二氧化氮)的测量数据及其变化特征分析。这些测量数据以激光雷达测量的高分辨率垂直分布为主,也包括相关的地面仪器测量结果和卫星数据。本书在对大量测量数据统计分析的基础上,分析被测大气参数的时间(昼夜、季节、年际)和空间(垂直分布、不同地区)变化特征,并给出相应的分布模式。

本书对于大气、环境、气象、空间、遥感等部门和领域的研究人员、业务人员、研究生以及大学教师具有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

激光雷达大气参数测量:中国东部重要大气参数高分辨率垂直分布探查 / 王英俭等著. —北京:科学出版社, 2014. 11

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-042165-4

I. ①激… II. ①王… III. ①激光雷达-应用-大气探测-参数测量-高分辨率-垂直分布-研究-中国 IV. ①P41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 239525 号

责任编辑:朱海燕 李秋艳 / 责任校对:张凤琴

责任印制:赵德静 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年11月第一次印刷 印张:25

字数:590 000

定价:159.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	孟 波	秦其明
单 杰	施 闯	史文中	吴一戎	徐祥德
许健民	尤 政	郁文贤	张继贤	张良培
周国清	周启鸣			

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业与信息化部和科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划（863 计划）将早期的信息获取与处理技术（308、103）主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”计划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为 863 计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示 973 和 863 主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加 863 计划地球观测与导航技术领域的项目、973 相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009 年 10 月

序

激光雷达自 20 世纪 60 年代初问世之后,在 50 多年中得到了迅速的发展。作为一种新的大气探测工具,它具有时空分辨率高、方向性和相干性优越、快速实时获取数据和精确度高等优点。我国大气探测的激光雷达也由当时的中国科学院地球物理研究所(1966 年后的中国科学院大气物理研究所)于 20 世纪 60 年代开始研制,并在测云等方面获得了初步成功。后又经过中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所几十年的研制和应用,发展了一系列用于不同探测目的的激光雷达,尤其是 90 年代以后,不但通过独立自主的集成创新研发了多种新激光雷达,包括 L625 激光雷达、双波长拉曼-米激光雷达、L300 双波米激光雷达、偏振激光雷达、AML-2 车载式大气环境监测激光雷达、偏振微脉冲激光雷达、纯转动拉曼激光雷达、车载拉曼-米激光雷达、直接探测多普勒测风激光雷达与 ARL-1 二氧化碳拉曼激光雷达等十余种,而且扩大了激光雷达的探测和应用领域,尤其在科技部“我国东部整层大气重要参数高分辨率垂直分布探查”重点研究项目的支持下,系统地开展了对大气臭氧(高度为 0~40km)、二氧化碳(高度为 0~3km)、大气气溶胶(高度为 0~35km)、大气温度(高度为 25~70km)、大气水汽(高度为 0~15km)、风向风速(高度为 0~15km)的高分辨率垂直分布的规范测量。这是目前国内的常规观测难以做到或无法做到的,尤其是在平流层和边界层(含近地面)的大气参数与气溶胶的观测资料。这些资料的初步应用,已揭示出一些有重要科学和应用价值的新结果和事实,是一份十分宝贵的新的资料集,因而无论是激光雷达的研发还是资料的探测和应用都达到了目前国际上同类工作的先进水平,是我国激光技术在大气探测应用研究中的一项重大科技成果,在世界上已占有一席之地。

从探测成果的科学意义上,我认为至少有下列几点值得重视。

(1) 大气温度、水汽和风的探测高度达到了中间层顶或平流层,超过了常规气象探测如探空仪的平均高度。这些资料对于改进对中国东部地区大气结构和环流的认识、检验数值天气或气候模式都是不可缺少的,也是常规观测所无法做到的。目前模式顶的高度都在平流层甚至中间层下部,而探空仪上升的平均高度为 20~30km。

(2) 由于获得了比较全面的大气气溶胶分布和变化的资料,对于国际上正在研究的气溶胶—云—降水相互作用问题可提供直接的观测事实。目前这方面的研究主要依据理论与模式研究,因而实际观测对于认识这种相互作用与检验模式以及理论结果的正确性十分重要。例如,由激光探测得到的在云区附近大气气溶胶粒子的数密度有明显变化,越接近云区,气溶胶粒子数越大,接近云区迅速增大。这表明,云的形成与大量气溶胶粒子的存在以及气溶胶粒子成为云滴的凝结核有密切关系。这意味着,气溶胶的源区如果水汽供应充分,有可能形成更多的云层。

(3) 从气溶胶微物理特性上证实了雾-霾转换的关键微物理参数。一般认为雾向

霾的转换主要是相对湿度，即如果相对湿度小于80%，雾可向霾转化；相对湿度在85%~95%之间为共存区间；相对湿度>90%则形成雾。北京地区的激光探测表明，气溶胶粒子数密度的变化可以作为一个关键因子。在重污染时期的污染边界层内，大粒子气溶胶浓度小于小粒子浓度，因而更细小的小粒子（如直径在0.2 μm 以下）在重污染区起着重要作用。这不但强调了PM_{2.5}气溶胶粒子是目前我国大气污染治理的重点，对于更细小的粒子如PM_{1.0}甚至更为重要。这对于中国目前和将来的污染防治都具有现实意义。

（4）火山爆发对平流层气溶胶分布的影响探测，有助于进一步了解火山爆发对全球和区域气候变化的影响（一般是降冷作用）。火山爆发被认为是引起全球气候变化的重要外强迫之一，国际上十分重视火山爆发后全球气溶胶分布的变化及其对气候的影响。

（5）激光探测得到的二氧化碳垂直分布表明，3km高度以下基本不变，而3km以上高度（国际上观测）呈现减少趋势。这表明，二氧化碳的浓度在3km以下可能已达到饱和，在3km高度以上远未饱和。因而随着二氧化碳排放的不断增多，低层的饱和层会不断增高，从而其向外的长波辐射层高度也不断升高。由于大气温度随高度递减，在高层更低温度下向外空放射的长波辐射量将不断减少，这使得辐射强迫变得越来越正，导致气候变暖加强。因而，观测二氧化碳饱和层的高度变化对于研究温室效应和气候变化具有理论意义。

（6）积累了有关激光大气探测十分重要的基础数据，包括光学厚度、散射、吸收系数、不同大气条件下的折射率、混浊度等，以及关于激光雷达研制中的各种重要参数与关键技术。这些科学的积累对于未来新一代激光雷达的发展和应用至关重要。

该书的成果虽是多年研究成果的总结，但实际上是一本有新成果的专著，其内容和深度在国内均处于领先水平，对于相关部门和领域的研究人员、业务人员以及大学教师都具有参考价值。

丁一汇

2013年2月18日于中国气象局

前 言

2011年2月出版的《科学》杂志在社论中指出,“科学就是数据,数据就是科学”,“数据推动着科学的发展”。大气科学也正是如此,它的不断发展需要借助于深入持久的大气探测数据的分析研究。大气气溶胶、大气臭氧、二氧化碳等重要大气参数是气候环境变化的重要因素,这些大气参数的分布及其变化对气候环境变化会产生重要影响。但是,究竟如何影响是极其复杂的,存在很大的不确定性,仍是目前颇具争论的问题之一。因此,对这些大气参数的长期观测研究已成为全球气候环境变化研究的关键内容之一。高中低空重要大气参数(包括大气臭氧、二氧化碳、大气气溶胶以及相关的温度、水汽和风等)高分辨率垂直分布(廓线)数据及其统计变化特征,是大气气候变化研究(如气候模式与模拟研究)以及环境变化评估的基础数据;同时,在高分辨率定量遥感 and 空间目标观测以及高效往返空间飞行器件和空间光通信等光电系统的研究发展和应用中,这些数据对大气影响的修正、系统的优化设计和性能评估,都起着极为重要的基础科学支撑作用。

在科技部科技基础性工作专项支持下,中国科学院合肥物质科学研究院自2007年12月开展了为期五年的“我国东部整层大气重要参数高分辨率垂直分布探查”的重点研究项目(2007FY110700)。在项目指导专家的指导下,在大气重要参数高分辨率垂直分布探测原有工作的基础上,通过对已有测量设备的技术改造和配套完善(主要是能够提供高分辨率数据的激光雷达系统),系统地开展对大气臭氧(高度为0~40km)、二氧化碳(高度为0~3km)、大气气溶胶(高度为0~35km)、大气温度(高度为25~70km)、大气水汽(高度为0~15km)、风向风速(高度为0~15km)的高分辨率垂直分布的规范测量。通过本项目的研究,建立完善的高分辨率大气参数数据测量技术标准以及测量实验、数据库和统计模式等的规范;利用已积累的激光雷达测量数据为主,也包括一些相关的地面仪器的测量结果和卫星数据,进行较系统的统计分析,给出中国东部重要大气参数(包括大气臭氧、大气气溶胶、二氧化碳以及相关的温度、水汽和风等)高分辨率垂直分布统计特征或模式,建立相应的数据库,获得其统计变化特征及季节等变化规律,为气象、环保、国防部门的科学研究、涉及环境问题的外交工作、高分辨率对地遥感提供相关的基础数据服务。

本书是科技部科技基础性工作专项测量结果及其统计分析的一个总结,其中也包括本项目承担单位中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所自20世纪90年代以来开展的激光大气探测研究的结果,许多观测数据,尤其是长期连续数据还是首次公开。本书分为四篇。第一篇介绍探测大气参数的多种激光雷达的探测原理、关键技术和测量数据分析方法等。为了全面了解本书给出的测量数据和统计分析结果,在第一篇中还介绍了合肥、北京、厦门和岳西(大别山区)等我国东部典型地区的测量地点的概况、多年来所自行研制的用于专项测量的各种激光雷达系统结构和技术指标,以及

它们的测量误差。第二至四篇分别是大气参数（温度、湿度和风场）、大气气溶胶和大气痕量气体（大气臭氧、二氧化碳、二氧化硫和二氧化氮）的测量数据及其变化特征分析。测量数据以激光雷达测量的高分辨率垂直分布为主，也包括相关的地面仪器测量结果和卫星数据。在大量测量数据统计分析的基础上，本书给出了被测大气参数的时间（昼夜、季节、年际）和空间（垂直分布、不同地区）的变化特征和有关分布模式。附录给出了我国东部重要大气参数高分辨率分布数据库的数据目录，供对相关数据有需要的读者参考。

参加编写的人员有：周军（第1章，第2章，其中纪玉峰第1.4.2.1节），胡顺星（第3章，第13章13.1节、13.2节、13.3节，第14章），曹开法（第13章13.4节、13.5节），谢晨波（第4章，第7章7.1节），董吉辉（第5章5.1节、5.2节），张彩云（第5章5.3节），吴晓庆（第5章5.4节），吴德成（第6章），胡欢陵（第7章7.2节，第12章），苑克娥（第7章7.3节，附录），王珍珠（第8章），徐青山（第9章），李学彬（第10章），黄印博（第11章），陶宗明（第15章）。王英俭、胡顺星、周军和胡欢陵负责内容组织、统稿和全文校阅。苑克娥和钟志庆对图表和文字格式做了统一整理。

本书的测量数据是中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学研究人员（包括专用仪器设备研制人员）和研究生数十年工作积累的结果，对于他们的辛勤劳动，表示由衷的敬意。由周秀骥院士、丁一汇院士、巢纪平院士、吕达仁院士、任阵海院士、石广玉院士和龚知本院士等专家组成的项目指导专家组对本项目给予了宝贵的指导，深表感谢。十分感谢周秀骥院士和丁一汇院士对本书稿提出的非常重要的修改意见。对于科技部的项目支持，特此致谢。

激光雷达大气探测是一门交叉学科，激光雷达技术随着激光技术、电子技术、计算机技术和大气科学研究的不断发展而发展，激光雷达也逐渐走向实用。本书主要介绍项目承担单位与项目相关的研究成果，没有涉及其他激光雷达技术和国内外相关研究单位及同行的研究成果。由于作者专业知识和学术水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大同行和读者批评指正。

目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

序

前言

第一篇 激光雷达大气参数探测技术基础和项目的测量背景

第1章 激光雷达大气参数探测技术	3
1.1 激光雷达技术基础	3
1.2 大气探测激光雷达工作原理	4
1.3 大气探测激光雷达发展趋势	27
1.4 大气探测激光雷达的基本结构和研制的关键技术	46
参考文献	57
第2章 探查使用的激光雷达及测量地点	63
2.1 探查使用的激光雷达	63
2.2 激光雷达大气测量误差分析	89
2.3 测量地点	95
参考文献	96

第二篇 大气温度、湿度、风测量及它们的变化特征

第3章 大气温度及其变化特征	101
3.1 大气温度	101
3.2 激光雷达探测大气温度不确定性分析	104
3.3 激光雷达探测大气温度廓线的实验验证	112
3.4 合肥地区大气温度分布特征	115
3.5 北京和厦门地区大气温度特征	120
参考文献	122
第4章 合肥地区水汽探测及其变化特征	124
4.1 大气水汽时空分布探测	124
4.2 大气水汽测量设备	127
4.3 大气水汽混合比垂直分布特征	129

4.4	大气可降水量变化特征	136
4.5	云液态水含量变化特征	141
4.6	地面大气水汽变化特征	144
	参考文献	146
第5章	合肥大气风场探测及其变化特征	147
5.1	大气风场探测的意义	147
5.2	Doppler 激光雷达大气风场测量	150
5.3	微波雷达测量风场技术及合肥风场变化特征	158
5.4	地面风场统计特征	174
	参考文献	177

第三篇 大气气溶胶测量及变化特征

第6章	合肥地区对流层和平流层气溶胶高度分布的统计特征及模式	181
6.1	激光雷达气溶胶测量数据对比及拼接	181
6.2	合肥地区对流层大气气溶胶高度分布特征	185
6.3	合肥地区平流层大气气溶胶高度分布特征	189
6.4	合肥地区大气气溶胶高度分布模式	193
	参考文献	203
第7章	合肥、北京、厦门气溶胶边界层变化特征	205
7.1	合肥气溶胶边界层高度变化特征	205
7.2	2001~2002年北京边界层环境试验结果分析	212
7.3	厦门气溶胶污染边界层高度分布变化特征	225
	参考文献	228
第8章	偏振激光雷达测量气溶胶与卷云退偏振比	229
8.1	气溶胶与卷云退偏振比变化个例分析	229
8.2	合肥地区气溶胶退偏振比季节变化统计特征	235
	参考文献	241
第9章	整层大气气溶胶变化特征	242
9.1	大气气溶胶光学厚度测量	242
9.2	合肥地区气溶胶光学厚度、浑浊度系数和波长指数变化特征	247
9.3	北京地区气溶胶光学厚度、浑浊度系数和波长指数测量分析	250
	参考文献	254
第10章	东部地区大气气溶胶谱变化特征	255
10.1	大气气溶胶谱和多道光学粒子计数器	255
10.2	北京、合肥、岳西和厦门地区平均谱分布特征	259
10.3	北京、合肥、厦门和岳西气溶胶数密度谱月平均对数正态分布拟合参数	263
10.4	特殊天气气溶胶特性分析	267
	参考文献	275

第 11 章	大气气溶胶散射系数和吸收系数的地面测量结果	277
11.1	测量地点和测量设备	277
11.2	合肥地区气溶胶散射系数和吸收系数的统计特征	278
11.3	北京地区气溶胶散射系数和吸收系数的统计特征	281
11.4	岳西地区气溶胶散射系数和吸收系数的统计特征	282
11.5	东南沿海地区气溶胶散射系数和吸收系数的统计特征	284
11.6	合肥地区黑碳气溶胶质量浓度的统计分析	286
	参考文献	288
第 12 章	大气气溶胶折射率测量及其变化特征	289
12.1	大气气溶胶折射率测量方法	290
12.2	不同方法测量结果的比较	296
12.3	IP 积分片法测量的气溶胶折射率虚部的地域和季节变化	299
12.4	北京 2001 ~ 2002 年夏、冬季气溶胶折射率虚部和实部的变化	300
12.5	扬沙、重污染和清洁大气气溶胶折射率	302
	参考文献	303
 第四篇 大气痕量气体浓度垂直分布的 测量及其变化特征		
第 13 章	大气臭氧及其变化特征	307
13.1	大气臭氧	307
13.2	大气臭氧的激光雷达探测方法及其研究进展	311
13.3	其他大气臭氧测量方法	314
13.4	合肥地区对流层和平流层大气臭氧变化特征	316
13.5	地面臭氧浓度变化特征	326
	参考文献	331
第 14 章	大气二氧化碳探测及其变化特征	335
14.1	大气二氧化碳	335
14.2	Raman 激光雷达探测大气二氧化碳	339
14.3	合肥地区大气二氧化碳的分布特征实例分析	344
	参考文献	354
第 15 章	边界层二氧化硫和二氧化氮测量及其变化特征	356
15.1	边界层内二氧化硫和二氧化氮	356
15.2	AML-2 大气环境监测激光雷达和地面微量气体测量分析仪	357
15.3	边界层二氧化硫和二氧化氮的变化分析	359
	参考文献	367
附录	我国东部重要大气成分测量数据库目录	368
索引		382

第一篇 激光雷达大气参数探测技术 基础和项目的测量背景

由于激光光源具有单色性好、相干性强、准直性高以及高亮度、大功率等特点，激光雷达技术得到快速的发展。激光雷达已成为强有力的探测手段，在大气、环境、气象、空间、遥感和军事等领域已得到广泛应用。通过激光与大气相互作用产生的瑞利散射、米散射、Raman 散射、荧光、吸收、偏振和 Doppler 效应等物理过程，激光雷达已被广泛应用于探测大气气溶胶、能见度、大气边界层、大气痕量气体、水汽、臭氧、大气风场、大气密度、大气温度、卷云等。本篇在叙述激光雷达大气参数探测原理和方法、基本结构和关键技术的基础上，介绍“中国东部整层大气重要参数高分辨率垂直分布探查”项目的背景，包括测量地点、在测量中使用的由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的激光雷达系统以及主要激光雷达的测量误差分析等。

第1章 激光雷达大气参数探测技术

1.1 激光雷达技术基础

激光雷达 (light detection and ranging, LIDAR) 以激光为光源, 通过探测激光与大气相互作用的辐射信号来遥感大气。激光与大气的相互作用, 会产生包含气体原子、空气分子、大气气溶胶粒子和云等大气成分的光学、物理和化学信息等辐射信号, 利用相应的反演方法就可以从辐射信号中得到大气成分的相关信息。因此, 激光雷达技术的基础是光辐射与大气成分之间相互作用所产生的各种物理过程。

激光在大气中传输时, 会产生空气分子的瑞利 (Rayleigh) 散射、大气气溶胶粒子的米 (Mie) 散射、非球形粒子的退偏振 (depolarization) 散射及气体原子的共振散射 (resonance scattering); 这些散射过程不改变散射光的频率, 故称为弹性散射。拉曼 (Raman) 散射则是一种非弹性散射, 是空气分子与入射光的能量相互作用产生的不同于入射光频率的光散射。大气中运动的气溶胶粒子和空气分子还会使散射光产生 Doppler 频移 (Doppler frequency shift)。

此外, 空气分子具有波长范围从紫外到红外、十分丰富的电子光谱吸收带和分子振动、转动光谱吸收带, 波长恰与大气中某些空气分子吸收谱线重合的激光在大气中传输时会受到空气分子的强烈吸收 (absorption)。

由于遥感的目标不一样, 导致探测的辐射信号也各有所异, 这样就产生了各种不同种类的激光雷达。表 1.1 给出了激光与大气相互作用的后向散射截面数值以及可探测的大气成分 (欣克力, 1984)。

表 1.1 激光与大气相互作用的后向散射截面数值以及可探测的大气成分

作用过程	介质类型	波长关系	后向散射截面 /($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$)	可探测的大气成分
瑞利散射	空气分子	$\lambda_r = \lambda_0$	10^{-27}	大气密度、温度
米散射	气溶胶、云	$\lambda_r = \lambda_0$	$10^{-26} \sim 10^{-8}$	气溶胶、烟羽、云等
拉曼散射	空气分子	$\lambda_r \neq \lambda_0$	10^{-30} (非共振)	痕量气体 (H_2O , SO_2 , CH_4)、气溶胶、大气密度、温度等
共振散射	气体原子、空气分子	$\lambda_r = \lambda_0$	$10^{-23} \sim 10^{-14}$	高层金属原子和离子 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 等
荧光散射	空气分子	$\lambda_r \neq \lambda_0$	$10^{-25} \sim 10^{-16}$	污染气体 (SO_2 , NO_2 , O_3 , I_2)
吸收效应	气体原子、空气分子	$\lambda_r = \lambda_0$	$10^{-21} \sim 10^{-14}$	痕量气体 (O_3 , SO_2 , NO_2 , CO_2) 等
Doppler 效应	气体原子、空气分子	$\lambda_r \neq \lambda_0$		风速风向

注: λ_0 为入射波长, λ_r 为散射波长

1960 年,世界上第一台激光雷达问世之后,激光以它的高亮度、高方向性和高单色性被迅速应用于大气探测中 (Goyer and Watson, 1963)。第一台探测大气的激光雷达是 Fiocco 和他的同事在美国麻省理工学院研制的一台红宝石米散射激光雷达,用于对流层和中间层大气的探测 (Fiocco and Smullin, 1963; Fiocco and Grams, 1964)。几乎与此同时, Ligda (1963) 在美国斯坦福研究所也研制了一台红宝石米散射激光雷达,用于对流层大气的探测。自那时起的 50 多年来,激光雷达以它精细的时间、空间和光谱分辨率、优越的方向性和相干性、大的垂直跨度、实时快速的数据获取以及高的探测精度吸引了各国科学家与工程技术人员的密切关注。随着激光技术、光学机械加工技术、信号探测与采集技术的不断发展和新的探测原理与方法的不断涌现,大气探测激光雷达技术取得了长足的进步。

我国的大气探测激光雷达科学技术水平也在不断地发展与提高。1965 年,中国科学院大气物理研究所研制成功我国第一台探测大气气溶胶的米散射激光雷达系统。自那时起,我国陆续涌现出一批大气探测激光雷达的科研单位,如中国科学院安徽光学精密机械研究所 (简称为中国科学院安徽光机所,现为中国科学院合肥物质科学研究所的组成部分)、中国科学院大气物理研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院空间科学与应用研究中心、武汉大学、中国海洋大学、西安理工大学、中国科学技术大学等在大气探测激光雷达研制及探测研究方面均具有一定的特色,取得了一批在国际上受到认可和赞赏的科研成果。当前,经济全球化及信息全球化进程的日益发展,全球气候变化、数字地球、大气和空间环境监测等领域的需求给我国激光雷达事业的发展带来了极大的机遇与挑战。

目前,大气探测激光雷达的种类已由早期的米散射激光雷达扩展为差分吸收激光雷达、Raman 激光雷达、高光谱分辨率激光雷达、偏振激光雷达、瑞利激光雷达、Doppler 激光雷达、共振散射激光雷达等多种类型的激光雷达。激光雷达由单波长单功能朝着多波长多功能发展;由夜晚探测向白天夜晚连续探测发展;由需要人工干预向着无人值守自动化运行发展;由实验室的研究设备向商业化产品转化。激光雷达的载体由地基发展为车载、船载、机载、球载及星载。这些激光雷达广泛应用于探测大气气溶胶、能见度、大气边界层、大气痕量气体、水汽、臭氧 (O_3)、大气风场、大气密度、大气温度等。随着激光雷达技术的不断发展,它在大气、环境、气象、空间、遥感和军事等领域将有更为广阔的应用前景。

1.2 大气探测激光雷达工作原理

从工作原理上讲,大气探测激光雷达与气象上的微波雷达没有根本的区别。发射系统向探测目标发射探测信号 (激光光束或微波波束),接收系统收集目标的后向散射回波信号,信号处理系统对回波信号进行反演处理,以获取探测对象的信息。然而,激光雷达使用的是激光光束,其波长在紫外、可见光及红外波段,这比使用毫米波的微波雷达要小好几个数量级。因此,大气探测激光雷达具有极高的角分辨率、距离分辨率和时间分辨率,测量范围广,能获得目标的多种图像,抗干扰能力强,与微波雷达相比具有体积小、质量轻、测量精度高、能连续自动测量等优点。

大气探测激光雷达按照其技术基础和应用领域，主要有以下八种类型的激光雷达。

1.2.1 米散射激光雷达

米散射激光雷达是最早出现的一种激光雷达，通过接收大气气溶胶和云的米散射回波信号测量大气气溶胶和云的结构和光学参数等（Fiocco and Smullin, 1963）。由于米散射激光雷达中采用的滤波器件（如干涉滤光片等）的带宽一般都在 $1\text{\AA}^{\text{①}}$ 以上，不能将大气气溶胶的米散射信号和空气分子的瑞利散射信号分开（She, 2001），因此米散射激光雷达实际接收的是大气气溶胶的米散射信号和空气分子的瑞利散射信号的总和。米散射和瑞利散射都是弹性散射，因此这种激光雷达也称为弹性散射激光雷达。

米散射激光雷达发射的激光在大气中传输时，受到传输路径上大气的衰减（主要来自大气气溶胶和空气分子的消光），同时一部分被大气气溶胶和空气分子散射的激光沿原路径返回，并且再次受到传输路径上大气的衰减，最终被激光雷达接收。米散射激光雷达接收的大气后向散射回波信号可以表示成如下米散射激光雷达方程形式：

$$P_L(z, \lambda_L) = K_L \frac{1}{z^2} \beta(z, \lambda_L) \exp \left\{ -2 \int_{z_0}^z \alpha(z', \lambda_L) dz' \right\} \quad (1.1)$$

式中， $P_L(z, \lambda_L)$ 为激光雷达接收的高度 z 处的大气后向散射回波功率（W）； λ_L 为激光波长（nm）； K_L 为激光雷达系统常数（ $\text{W} \cdot \text{km}^3 \cdot \text{sr}$ ）； $\beta(z, \lambda_L)$ 为高度 z 处的大气在波长 λ_L 上的后向散射系数（ $\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ）， $\beta(z, \lambda_L) = \beta_m(z, \lambda_L) + \beta_a(z, \lambda_L)$ ， $\beta_m(z, \lambda_L)$ 和 $\beta_a(z, \lambda_L)$ 分别为空气分子和大气气溶胶的后向散射系数； $\alpha(z, \lambda_L)$ 为高度 z 处的大气在波长 λ_L 上的消光系数（ km^{-1} ）， $\alpha(z, \lambda_L) = \alpha_m(z, \lambda_L) + \alpha_a(z, \lambda_L)$ ， $\alpha_m(z, \lambda_L)$ 和 $\alpha_a(z, \lambda_L)$ 分别为空气分子和大气气溶胶的消光系数； z_0 是激光雷达所在的高度（km）。

求解米散射激光雷达方程主要有两种常用的方法：Klett 方法和 Fernald 方法。在大气气溶胶浓度较大的情况下，如果空气分子的后向散射系数和消光系数与大气气溶胶的后向散射系数和消光系数相比可以被忽略，Klett（1981）假设大气消光系数和后向散射系数满足以下关系：

$$\beta(z, \lambda_L) = \frac{\alpha(z, \lambda_L)^k}{S_1} \quad (1.2)$$

式中， k 为一个常数，变化范围一般为 $0.7 \sim 1.3$ ，典型值取为 1； S_1 为一个常数。

将式（1.2）代入式（1.1）中消去大气后向散射系数，经过化简得到一个 Bernoulli 方程。求解这个方程，就得到大气消光系数：

$$\alpha(z, \lambda_L) = \frac{\exp \{ [S(z, \lambda_L) - S(z_c, \lambda_L)] / k \}}{[1/\alpha(z_c, \lambda_L)] - 2/k \int_{z_0}^z \exp \{ [S(z, \lambda_L) - S(z_c, \lambda_L)] / k \} dz} \quad (1.3)$$

式中， $S(z, \lambda_L) = \ln [P_L(z, \lambda_L) z^2]$ ； z_c 为选取边界值 $\alpha(z_c, \lambda_L)$ 的高度，为了防止分母接近 0 而导致计算的大气消光系数不稳定， z_c 一般都取在较远的距离处。这个方法称为

① $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$