

云探测中的激光雷达技术研究进展

狄慧鸽, 华灯鑫*

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 云宏观参数的探测对云物理和气候变化研究具有重要意义。激光雷达是实现云宏观参数高时空分辨率探测的有效的重要科学仪器。回顾和总结了激光雷达在云参数探测中的主要技术及其研究进展, 讨论了激光雷达在云探测研究中的不足和局限性及目前在云探测应用中亟待解决的关键问题, 展望了激光雷达未来在云探测中的应用潜力, 并提出了研究思路与方案。内容涉及云检测和云相态识别的多波长及偏振激光雷达和云内温度、湿度、风速风向与垂直气流探测等激光雷达技术与方法, 分析讨论了云系降水潜力探测的激光雷达应用案例。激光雷达对于探测初生云团及稀薄云层具有较好的穿透性及精细探测优势, 但对于强对流云等厚云层, 需将其与其他探测手段如微波雷达等联合观测, 并开展多源数据融合技术研究, 以实现云全生命周期的精细化监测。随着激光与光电子技术和大数据及人工智能技术的发展, 激光雷达技术日趋成熟, 面向业务化应用所需的系统稳定性、可靠性及探测能力的激光雷达产品将越来越受到气象与环境领域行业专家的关注, 并将在云探测领域中发挥越来越重要的作用。

关键词 大气光学; 激光雷达; 云宏观参数; 云相态; 综合观测

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0600002

Research Progress of Lidar in Cloud Detection

Di Huige, Hua Dengxin*

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract The detection of cloud macro- and micro-parameters is of great significance to the study of cloud physics and climate change. Lidar is an effective scientific instrument to detect cloud macro- and micro- parameters with high temporal and spatial resolution. This paper reviews and summarizes the main technologies and research progress of lidars in cloud parameter detection, discusses the shortcomings and limitations of lidars in cloud detection and the key problems to be solved in cloud detection application, looks forward to the application potential of lidars in cloud detection in the future, and puts forward the research ideas and schemes. The content involves the multi-wavelength and polarization lidar technology for cloud detection and cloud phase recognition, the lidar technology for cloud temperature, humidity, wind speed, wind direction, vertical air flow detection, and so on. The application case of lidars for cloud precipitation potential detection is analyzed and introduced. Lidars have good penetration and fine detection advantages for detecting primary clouds and thin clouds, but for thick clouds such as strong convective clouds, it needs to be combined with other detection instrument, such as a microwave radar, and carry out research on multi-source data fusion technology, so as to realize fine monitoring of the whole life cycle of clouds. With the development of laser and optoelectronic technology and big data and artificial intelligence technology, lidar technology is becoming more and more reliable. Lidar products for system stability, reliability, and detection capability required for business applications will be paid more and more attention by industry experts in the field of meteorology and environment, and will play a more and more important role in the field of cloud detection.

Key words atmospheric optics; lidar; cloud macro- and micro-parameters; cloud phase; comprehensive observation

收稿日期: 2022-01-10; **修回日期:** 2022-01-28; **录用日期:** 2022-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(42130612, 41627807, 61875163)

通信作者: *dengxinhua@xaut.edu.cn

1 引言

云是天气观测和预报的重要参量,也是研究气候变化的关键性因子,并在水循环和调节全球水资源分布中扮演着极其重要的角色^[1]。正确认识云物理变化、时空结构特征与演变情况是揭示气候变化过程的前提,同时还可以提高人们对大气云水资源开发利用、天气精细化预报和气象防灾减灾的能力^[2]。提高对云的观测能力是对云中重要物理过程认识的关键,也是提高云数值模拟能力的关键环节,对于我国当前的重大国家战略——云水资源的开发利用及加强人工影响天气的高质量发展具有重要的意义。当前人们对云进行观测的主要技术手段有地基遥感、飞机观测和卫星遥感三种。地基遥感是人们进行云物理特征观测的主要手段。近些年,随着遥感观测手段的日益丰富,特别是激光雷达、毫米波雷达和天气雷达等遥感廓线探测技术与手段的应用,实现对云的长期连续的、高时空分辨率廓线与剖面的观测,已经成为研究大气及云发展变化的重要方式与探测手段。激光雷达具有高时空分辨率的特性,在近二十年得到了快速发展及推广和应用,在大气、气象及环境研究及应用中展现出独一无二的优势,是当前云物理研究中不可欠缺的科学仪器。

国内外很多研究学者与科研团队利用激光雷达对云进行了探测研究及应用尝试,受云对光波的强吸收与衰减的影响,目前这方面的研究主要集中在薄云的云相态识别和云底高度等探测。但对于大气与气象等云研究及业务应用专家急需的云高、云相态、微物理参量、温湿度场等综合的宏微观结构参数,单一的遥感探测技术与手段无法同时获得云内的具有高时空分辨率及高精度廓线的探测,这严重制约了云物理研究的发展。激光雷达作为无线电波遥感向光波遥感的科学技术手段,基于光与大气物质(粒子、分子与原子)相互作用的原理,已经演化及发展出多种不同探测目标的激光雷达技术,这些技术可以实现大气温度、湿度^[3-4]、风速风向^[5-6]、气溶胶与云的光学参数及气溶胶粒子谱^[7]等参量的高时空分辨率的廓线探测。在云内特别是较薄云层的宏微观结构探测中,激光雷达具有很好的探测优势及应用潜力。本文综述了近些年国内外激光雷达在云宏观参数与微观参数探测及气溶胶与云相互作用研究的现状及进展,介绍了激光雷达在云系降水潜力探测方面的综合应用范例。针对激光雷达在云探测中的优势与局限性,结合作者自身及研究团队的研究成

果及体会,提出对云全生命周期的精细化监测技术的展望和思路。

2 云底高度和云相态探测激光雷达

激光雷达在云探测中应用最多的就是云底高度的检测,在云底高度识别及云相态识别上表现出了优异的性能,是实现云底高度及云相态检测的高精度遥感仪器。米散射激光雷达可实现对云底高度的探测,针对激光雷达信号,人们发展了很多算法,如阈值法、零交叉微分法、连续小波变换法及改进的简单多尺度法等^[8-9]。激光雷达探测云底的精度高,在单层云的检测中具有优势,激光云高仪已经得到了推广和应用。

云相态是指云所处的热力学状态,即液态或固态。云的相态随着温度的不同可能为水云、冰云和混合云,不同相态的云粒子具有不同的形状特征及吸收与散射特性,直接影响到各种尺度天气系统的形成与演变。云相态不仅是云参数研究的重要内容,而且是反演其他云微物理参数的前提。云相态的检测主要是利用偏振激光雷达来实现的。图1展示了美国CALIPSO卫星上搭载的偏振激光雷达系统的基本原理结构图。

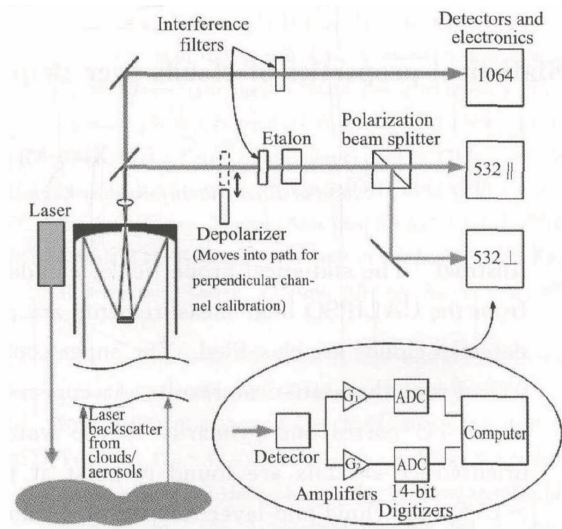


图1 CALIPSO卫星上的偏振激光雷达系统探测原理图^[10]

Fig. 1 Detection principle of polarization lidar on CALIPSO satellite^[10]

偏振激光雷达通过探测到的激光退偏比大小来实现云相态的识别。基于上述原理的退偏比探测已经被广泛应用于大气非球形粒子形态的遥感测量和对沙尘暴、水云冰云、火灾烟雾的判别中。大多数的偏振激光雷达可获取线偏振光的退偏比,也有一些激光雷达可发出圆偏振激光,从而获取圆偏振光的

退偏比。退偏比的大小反映了粒子的非球形程度,根据退偏比大小来判断被探测粒子的非球形度,并以此来识别云相态。偏振激光雷达最早出现在 20 世纪 90 年代,美国 Sassen 等^[11]利用偏振激光雷达详细研究了不同相态云的退偏振特性;CALIPSO 卫星上也设置了波长为 532 nm 的偏振探测通道,通过测量信号获得相应的激光雷达产品信息,如退偏比、云相态和大气后向散射系数等;Cho 等^[12]利用星载激光雷达(如 CALIPSO)或地基激光雷达对云相态、云底高度、后向散射系数等进行了分析与研究;路小梅等^[13]利用 CALIPSO 激光雷达数据对北京地区云层的数据进行了统计分类。

线偏振激光雷达结构简单,因此获得了广泛应用,但是它在探测云相态时也有缺陷,即当云中出現规则排列的冰晶时,退偏比的大小不再反映粒子的非球形特性。例如:人们通常认为退偏比小的粒子为水云,退偏比大的粒子为冰云;但是 Hu 等^[14]指出,当云中有水平导向的片状冰晶时,会出现退偏比接近 0 的情况。为了解决这个问题,人们通过引入更多的探测参数进行识别,如引入后向散射系数及雷达比信息;还有一些专家采用全偏振探测手段^[15]来实现云中规则导向冰晶的探测。当激光雷达搭载到卫星上时,云中的多重散射会导致水云中退偏比过大,这也是应用偏振激光雷达时需要考虑的一项重要因素。

3 云微物理参量探测激光雷达

云、气溶胶和辐射之间的相互作用是气候系统中最大的不确定性源之一^[16-17]。气溶胶作为云的凝结核(CCN),通过改变云的宏观物理特征来影响云、降水及地球能量收支^[18]。研究云的形成过程首先需要加强气溶胶-CCN-云滴之间的观测研究^[19]。气溶胶如何作为 CCN 活化成云滴的形成过程还没有直接的科学观测数据,尽管人们已经认识到这些研究的重要性,但是受观测手段的限制,这部分的研究主要局限于实验室内模拟和统计分析。激光雷达是进行气溶胶及云相互作用研究的有力工具,由于其波长位于紫外到近红外波段,探测气溶胶及初生云团具备天然优势。研究气溶胶与云的相互作用,需要获取云在形成、发展及消散阶段的气溶胶及云微物理参量,即云底高度、云底附近气溶胶微物理参量、CCN 数浓度、云底附近云滴谱分布等,通过多波长及拉曼激光雷达可以获取这些参量,但是该过程需要较为复杂的数据反演算法。

近 30 年以来,研究者们尝试利用多个波长的激光雷达对气溶胶进行探测,以获取垂直高度上的气溶胶粒子谱及微物理参量信息。目前受到广泛认可的技术手段是采用三波长(355, 532, 1064 nm)拉曼激光雷达来探测大气气溶胶粒子谱分布及微物理参量信息^[20]。多波长激光雷达在获取大气光学参数后,采用正则化算法^[21]、线性估计算法^[22]或主成分分析算法^[23]等可以实现气溶胶粒子谱分布信息的反演及微物理参量的估计,这些算法无需探测气溶胶的复折射率和粒子谱分布等假设条件,因此得到了广泛应用。正则化方法是目前国际上比较受认可和通用的粒子谱反演方法,该方法的核心思想是利用多个样条函数(最少 5 个),通过数值逼近的方法得到粒子谱分布,数据反演流程^[24]如图 2 所示。但是该方法需要的激光雷达系统比较复杂,同时对光学参数的准确度要求较高,目前利用该算法对于有效半径的探测误差约为 30%,体积浓度的误差约为 40%,数浓度的误差较大,可达 60%。除了三波长激光雷达,双波长激光雷达计算得到的色比也可以用于表征粒子尺度的大小变化特征。

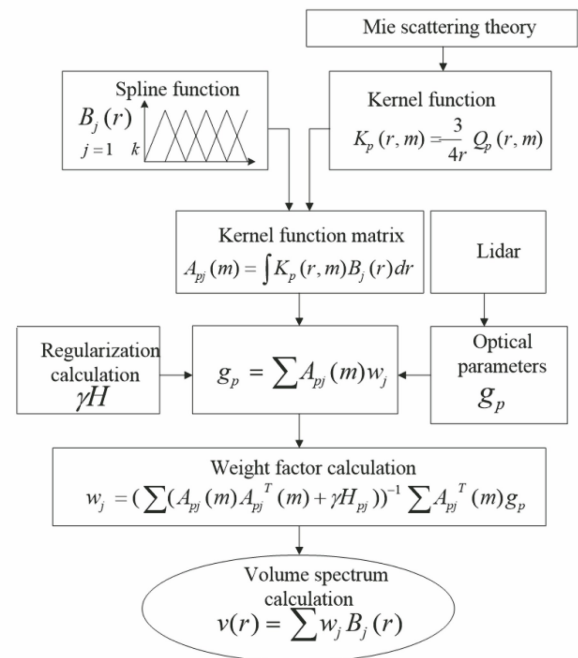


图 2 基于正则化算法的体积谱反演算法流程^[24]

Fig. 2 Calculation steps for inversion of volume spectra based on regularization algorithm^[24]

CCN 数浓度的遥感探测与反演是一项具有挑战性的工作,目前 CCN 数浓度都是通过将云凝结核计数器搭载在不同的平台上进行观测得到, Tan 等^[25-26]对利用激光雷达探测 CCN 数浓度的方法进

行了探讨和仿真计算。CCN 的遥感探测需要利用多波长激光雷达获取气溶胶粒子谱分布,利用拉曼激光雷达获取实时的温度廓线和湿度廓线,计算出光学参数的吸湿性增强因子、活化率等参数,进而计算

得出 CCN 数浓度。图 3 给出了利用激光雷达探测 CCN 的方案和思路。尽管上述研究提出了较为可行的思路和方案,但是这些方案所需要的系统复杂,种类繁多,目前并没有得到实际观测数据。

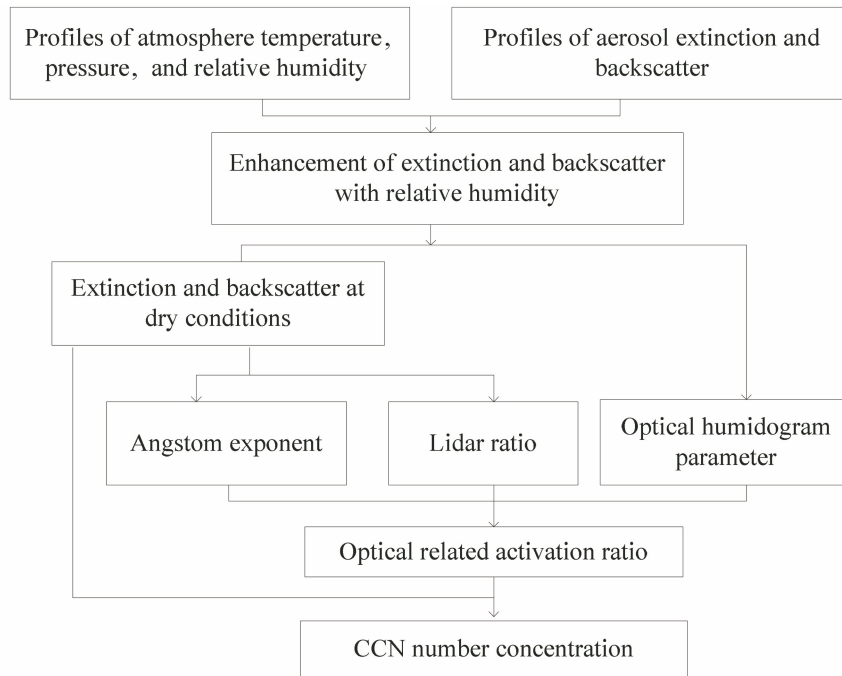


图 3 利用多波长拉曼激光雷达探测 CCN 的流程图^[26]

Fig. 3 Schematic diagram of proposed method to retrieve CCN using multi-wavelength Raman lidar^[26]

在云微观参数研究方面,受限于现有探测技术与手段,在很长一段时间里,科学家们对云微观属性的认识不足。获取精确的云滴谱需要利用有限的飞机观测资料,也有学者利用卫星平台搭载的遥感仪器对云微观参数进行反演,获得了云发展过程中的云参数变化^[1],但是卫星光谱仪器遥感只能获取云系上层云的云顶附近信息,很难获取云系内部及中下层的消息。激光雷达结合毫米波云雷达,并结合特殊的算法,可以实现卷云内部微物理参数的反演^[27]。冰晶粒子形状多样,且多为不规则粒子,对后向散射影响较大,通过采用激光雷达的消光系数和毫米波雷达的等效反射率因子并通过假定卷云粒子分布为对数正态分布,来进行卷云微物理参数的反演。Wang 等^[28-29]将激光雷达和毫米波雷达相结合,实现了卷云中冰水含量和云中平均有效半径的探测,给出了较为稳定的数据反演算法。随着近些年光电探测技术的迅速发展,激光雷达不仅对卷云有较好的探测性能,对于薄的对流云等非降雨云也具有很好的探测能力,因此将激光雷达和毫米波雷达相结合用于对暖云中云滴谱的探测具有可行性和很好的预期效果。

4 云内气象场探测激光雷达

云是一个开放、动态变化的系统,即云体始终处于不断变化中^[30]。云的变化是微物理过程、热力学过程和动力学过程相互作用的结果。受限于观测手段,研究人员对云中热力和动力过程的研究还很有限。要研究云中热力场,需要知道云中的温度和相对湿度;动力场主要指云中的风速、风向和垂直气流速度。人们采用无线电探空仪、毫米波多普勒雷达、风廓线雷达和微波辐射计等垂直观测设备进行大气中气象场的探测,激光雷达也可以实现大气中气象场的高时空分辨率、高精度探测。但是,对于云内气象场的探测,由于其复杂性和特殊性,还有很多问题有待解决。

拉曼激光雷达、高光谱分辨激光雷达、多普勒激光雷达和差分激光雷达等被研发,用于大气气象廓线的探测。但是,被用于云内温湿度探测的激光雷达并不多,利用激光雷达探测温度的主要技术是基于转动拉曼的探测技术。在晴空情况下的温度和湿度探测方面,激光雷达技术已经较为成熟,但是当有云层出现时温度的探测就比较困难。其主要原因是

温度的探测主要基于转动拉曼信号或瑞利信号的变化来实现,而转动拉曼信号和瑞利信号光谱距离米散射信号光谱太近,很难将米散射信号与拉曼或瑞利散射信号完全分离。

目前已有的云中温度探测技术主要是采用转动拉曼激光雷达的技术。Behrendt 等^[31]尝试利用叠加窄带滤波器分离转动拉曼信号的方法实现了较薄云层(后向散射比为 45)温度的探测,温度统计误差为 1 K。中国科学院安徽光学精密机械研究所 Wu 等^[32]尝试利用激光雷达对云中温度廓线进行探测,研发了转动拉曼激光雷达,用于探测云中温度。这台转动拉曼激光雷达安装在飞机上,选用 354.7 nm 作为激励激光波长,温高和温低信号波长分别为

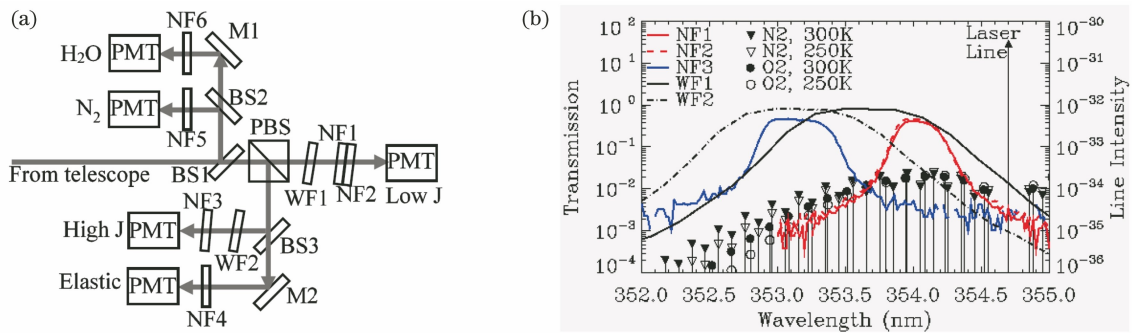


图 4 测温转动拉曼激光雷达分光系统及分光光谱图^[32]。(a)分光系统原理图;(b)分光光谱图

Fig. 4 Spectroscopic system and spectrogram of thermometric rotational Raman lidar^[32].

(a) Principle of spectroscopic system; (b) spectrogram

相对湿度是温度和水汽密度的函数,云中湿度的探测最重要的是要先获取云中的水汽密度或水汽混合比。较为成熟的水汽廓线的探测技术是采用大气中的振动拉曼信号来实现水汽密度或水汽混合比的探测,水汽的光谱距离激发波长的光谱较远,频移为 3657 cm^{-1} (354.7 nm 作为激发波长时,水汽的振动谱线的中心波长为 407.5 nm),分光系统实现起来比较容易,分光片+滤光片^[34]或光栅分光系统都可以用来实现水汽的探测^[35]。对于云中水汽信号的探测,需要考虑到云中液水或冰水的影响,因为液水和冰水的光谱间隔很近,在云中很容易混进水汽通道,造成水汽探测的误差。图 5 展示了大气中三相态水的拉曼光谱曲线,图中 407.5 nm 为水汽的拉曼散射谱线峰值波长,402.9 nm 为液态水的谱线峰值波长,398.7 nm 为固态水的光谱曲线峰值波长。武汉大学 Liu 等^[36]利用 32 通道光栅光谱仪获得了大气中三种相态水的完整拉曼光谱,西安理工大学 Wang 等^[37]将多通道的分色片和滤光片相结合,实现了大气中三相态水含量的探测。相对于

353.14 nm 和 354.03 nm,系统通过将多个窄带滤波器和宽带滤波器相结合来实现拉曼散射信号的高纯度提取,分光系统温高和温低通道的抑制率可以达到 10^8 和 10^7 。图 4 展示了该转动拉曼激光雷达的光路图[图 4(a)]及光谱图[图 4(b)]。该系统最终实现了云中温度 0.5 K 的探测精度。高抑制率的分光系统实现起来难度较大,太多滤光片的应用尽管提高了对米散射信号的抑制率,但是也进一步降低了探测信号的透过率,这造成激光雷达系统探测能力的降低。因此有人提出了采用后期修正米散射信号的方法来得到云中温度^[33],但是该方法对修正系统常数的灵敏度较高,不具备通用性,因此并没有在云中温度的探测中得到广泛应用。

氮气拉曼散射信号,水汽信号很微弱,特别在云中,受到云粒子强烈散射的影响,透过率较低,要实现大距离的探测需要高灵敏度的探测技术。

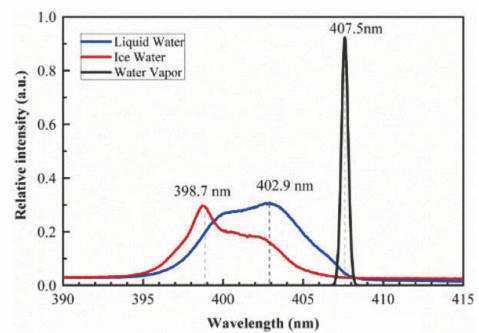


图 5 三相态水的拉曼光谱曲线^[37]

Fig. 5 Raman spectra of three-phase water^[37]

多普勒激光雷达可以实现风速、风向的探测,相对于水平风速探测,云中垂直气流速度的探测较为困难。当前云中垂直气流速度的探测主要是利用毫米波雷达,通过解析功率谱的方法实现云中垂直气流速度的反演,但是该方法在云边界处会出现因探

测灵敏度不足而无法进行探测的现象。相干多普勒激光雷达是实现高时空分辨率风速探测的有效手段。但是当前很多基于相干多普勒激光雷达测量空气垂直运动速度的方法只适用于空中无降水的情况,因为激光雷达所接收到的回波信号来自空气分子、气溶胶粒子或云滴粒子,可以认为它们的垂直运动速度是空气块的垂直运动速度。但当空中有降水发生时,降水粒子也会散射激光,它们有自身的下落速度,该速度并非空气块的垂直运动速度。当空中有下落雨滴时,相干多普勒激光雷达的功率谱通常会像毫米波雷达一样表现出双峰结构,如图 6 所示。

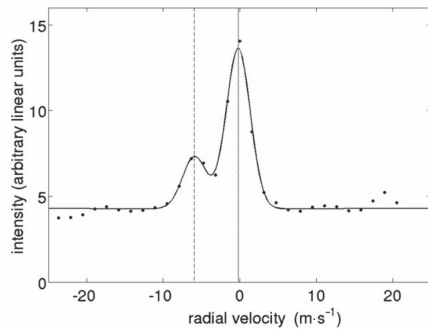


图 6 多普勒激光雷达探测到的降雨时功率谱 (左:气溶胶功率谱;右:雨滴产生的功率谱)^[38]

Fig. 6 Power spectra detected by Doppler lidar during rainfall (left: aerosol power spectrum; right: power spectrum generated by raindrops)^[38]

双峰分别来自气溶胶散射和雨滴反射,信号的谱宽可以用来识别降水时间,通过双高斯模型拟合多普勒频谱可以获得雨速和气流垂直运动速度^[39]。通常,降雨信号的强度和降雨率成正比。因此,在不同的降雨强度下,雨信号和气溶胶信号之间会有不同的相对强度。当降雨强度变大时,两个信号的强度可能相似并且可以很好地被识别。风和雨速度的差异主要体现在垂直方向上,垂直风速在零附近,而雨滴受到重力作用相对空气向下运动;还可以通过云滴信号和雨滴信号谱宽的差异来区分垂直气流和雨滴信号。

人们利用多普勒激光雷达探测到了降雨时边界层的垂直气流速度,Lottman 等^[40]利用多普勒激光雷达探测到了云边界处的垂直风速。相对于边界层内,受探测能力的限制,多普勒激光雷达还没有被更多地应用于云中垂直气流的探测。云中粒子尺度相对于气溶胶粒子要大很多,散射信号容易受到湍流、风切变等的影响,因此云中粒子数据反演需要考虑的因素更多。

5 云系降水潜力的综合遥感探测激光雷达

激光雷达具有高时空分辨率的探测优势,可以实现气溶胶、云底处云粒子及云层中下部气象参数的探测,可以用于云系降水潜力的探测。云系降水潜力是指某个地区某一时段出现过的总云水量,当前云系降水潜力的评估方法主要是利用再分析资料或中尺度数值模式计算,缺乏对云系降水潜力的直接观测数据。西安理工大学和兰州大学共同承担的国家自然科学基金重大仪器专项项目针对云系降水潜力评估中的观测技术展开研究,重点研发了大气柱可凝结水量的激光雷达遥感探测系统。云系降水潜力与云的各种宏微观参数紧密联系,并与多重大气参数相关,主要取决于水汽供应和上升气流的分布,在由上升气流导致的云水凝结量观测中,并没有现成可用的仪器。

云是含有液态水(或冰)的饱和湿系统,属于二元多相系。当云底有向上的垂直气流将云下的水汽带入云层中时,可以认为这部分水汽中的很大一部分将会生成凝结水,云下水汽含量越丰富,上升气流速度越大,进入云中的水汽通量越多,则可转换的凝结水含量就可能越大。由于大气中大多数重要的热力过程,特别是空气的垂直运动过程,可以看成是绝热的,因此气柱中一段时间内凝结的水量与云底的饱和水汽密度及云底的上升运动速度成正比。如果能获取云底的上升速度 $v(t)$ 及云底的饱和水汽密度 $S_H(T)$,则 $S_H(T) \cdot v(t)$ 即为进入单位面积云层的水汽通量,单位为 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,对这个量进行时间上的积分,可得

$$p_{\text{cong}} = k \int_0^{t_0} S_H(T) \cdot v(t) dt, \quad (1)$$

式中: p_{cong} 为单位面积上的大气在 $0 \sim t_0$ 时段总的水汽通量; k 为水汽转化为云水的转化系数,由于蒸发及云中湍流的存在, k 值总小于 1, k 值的大小还与 CCN 的数量有关,该值随着大气状态及云层宏微观参数的不同而发生变化,为了方便讨论,本文取 k 为 0.6。

水汽密度 ρ_v 与大气温度 T 之间的关系^[8]为

$$\rho_v = \frac{e}{R_v T} = \frac{\epsilon e}{R_d T}, \quad (2)$$

式中: $\epsilon = 0.622$; R_d 为干空气气体常数, $R_d = 287.05 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; e 为水汽压,单位为 kg/m^3 。饱和水汽密度可以由该温度下的饱和水汽压及(2)式

得到。用 $e_s(T)$ 表示温度 T 下的水面饱和水汽压, 单位为 Pa。由 Tetens 经验公式可计算得到

$$e_s(T) = 610.78 \exp[17.2693882(T - 273.16) / (T - 35.86)], \quad (3)$$

在 0°C 以下的水面饱和水汽压值的计算式为

$$e_s(T) = 611.2 \exp[17.67(T - 273.15) / (T - 29.65)]. \quad (4)$$

由上述公式讨论可以看出, 大气柱内垂直方向上凝结出的云水量由大气垂直运动速度、云底温度和转换系数 k 所决定。因此, 只要连续地测出云底温度(同时可计算相应的饱和水汽密度)和云底垂直气流

速度, 就可计算出大气柱凝结水量。需要说明的是, 从云顶溢出的空气中包含一定的水汽, 使云中真正能凝结出的云水比进入云底的水汽少; 但对于较大厚度的云层而言, 云顶温度要比云底低很多, 云顶处的饱和水汽密度要远小于云底, 因此可以将此项忽略。

根据上述原理, 西安理工大学研发的空中凝结水综合探测激光雷达系统由湿湿探测激光雷达、相干多普勒激光雷达和米偏振激光雷达组成, 可以实现云底高度、云底温度湿度和云底垂直气流速度的探测。大气柱凝结水的激光雷达观测技术路线如图 7 所示。

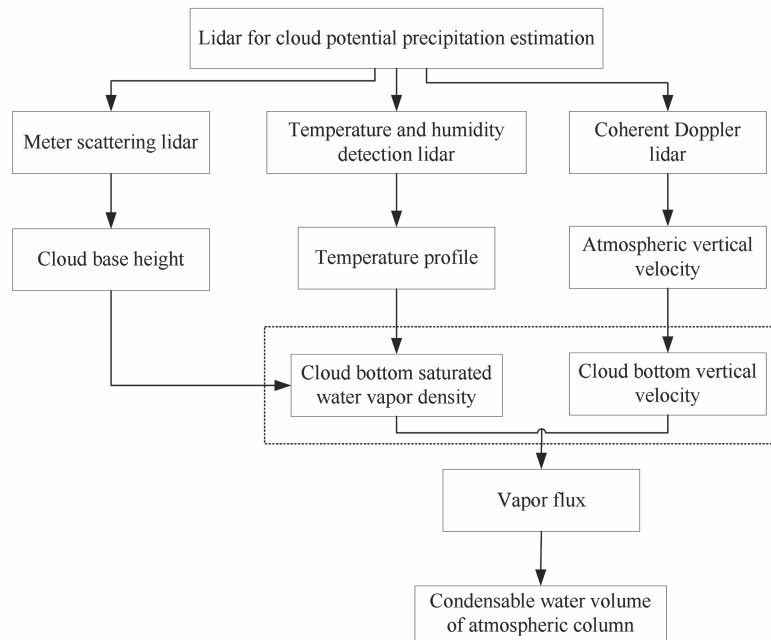


图 7 大气柱凝结水量的激光雷达观测技术路线

Fig. 7 Technical route of lidar observation for atmospheric column condensation water

该综合探测激光雷达在西安市大气探测研究中心进行了温度和风速探测的比对分析, 效果良好。该雷达于 2020 年 3 月 4 日探测到了一次层状云的弱降雨过程, 获取了云底高度、云底温度和云底垂直

气流速度, 通过(1)~(4)式计算得到通过云底进入云层中的水汽密度通量及凝结水含量。图 8 展示了该激光雷达的米散射通道信号随时间和高度的变化图(THI)。层状云在 2020 年 3 月 4 日的 19:00 前

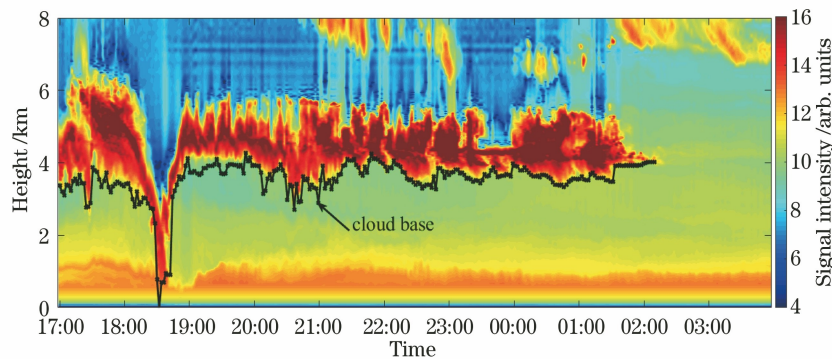


图 8 激光雷达 1064 nm 的距离平方校正信号(THI)

Fig. 8 Range square correction signal of laser radar at 1064 nm (THI)

出现了弱的降雨过程,随后底层云又持续了7 h后消散或飘离。

图9展示了云底温度和垂直气流速度随时间的变化序列,以及进入云层的瞬时水汽通量。从图9(a)中可以看出该时段内,除了降水时段外,云底温度变化不大,主要是因为云底高度基本没有发生变化。图9(b)展示的是云底垂直气流速度,云底垂直

气流速度数值很小,在 $0.3\sim 0.5\text{ m/s}$ 之间波动。该探测结果与层状云气流速度相符合。图9(c)为计算出的水汽瞬时通量,由于弱的垂直气流特性,水汽通量并没有很大。根据水汽通量,最终得到在探测时段内的总水汽通量为 30.4 g/m^2 ,换算成凝结水量的估计值为 3.66 mm 。该综合探测激光雷达系统实现了大气柱凝结水含量的测量与初步评估。

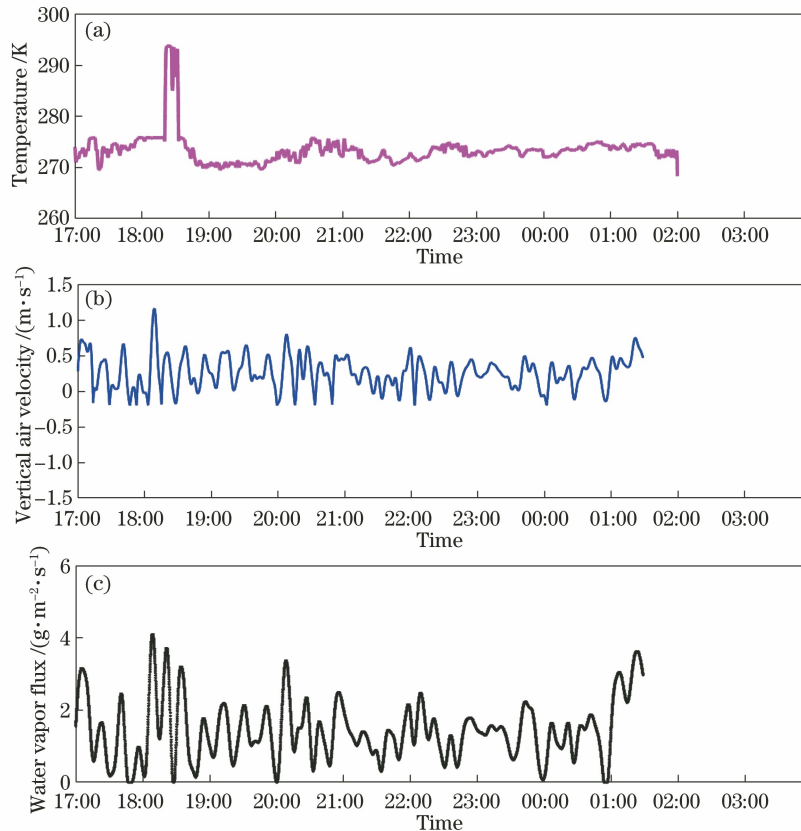


图9 云系降水潜力探测激光雷达获取的云底参数时序图。(a)温度;(b)垂直气流速度;(c)水汽通量

Fig. 9 Cloud bottom parameters obtained by lidar for cloud precipitation potential detection.

(a) Temperature; (b) vertical air velocity; (c) water vapor flux

6 云全生命周期的精细化遥感技术展望与思考

云生成、持续到最后消散的全生命周期状态监测对业务应用和科学研究都是非常重要的,激光雷达可以实现初生云团及云消散过程的高时空分辨率监测,在云的探测上也发挥出越来越重要的作用。但是,激光雷达具有波长短的特性,对云层进行探测时受到粒子强散射的影响,穿透深度受到限制,对云的探测还有局限性,因此当前激光雷达探测依然是集中于对稀薄云层、初生云团、卷云或一般云中下部的探测。云物理的研究需要获取云的宏微观综合特性参数,要实现高时空分辨率、大范围(云底到云顶)和多参数的综合云特性探测,仅利用激光雷达是不

够的,可以将不同探测机制的遥感设备相结合,实现多参数、大时空范围的云全生命周期的精细化遥感。将较短波长的激光雷达技术与微波或毫米波遥感技术相结合,不仅可以实现云层大空间范围的探测,通过数据融合和相互校正还可以实现获取数据质量的提升。

西安理工大学主持的国家自然科学基金重点项目“云宏微观结构特征的遥感探测方法与实验观测研究”中提出利用多波长激光雷达、拉曼激光雷达、相干多普勒激光雷达、毫米波云雷达、微波辐射计和微雨雷达等主被动相结合、长短波遥感相结合的探测方式来实现云全生命周期中宏微观参数的探测。将温湿探测激光雷达与微波辐射计相结合,实现大

气温湿度廓线的无球探空技术, 此项技术已经有了一定的研究和进展, 取得了较好的探测效果。多波长拉曼激光雷达与毫米波雷达联合观测不仅可以获取云下气溶胶和 CCN 数浓度的探测, 通过长短波回波信号的获取还可以实现云滴谱的获取。多普勒激光雷达可获取云中垂直气流速度, 与多普勒毫米

波雷达联合使用, 不仅可以获取云边界处的气流速度, 还可以得到厚云层的气流运动状态, 这时需要特别的数据处理方法来提取准确的气流速度。多种遥感仪器的联合观测可以实现云宏微观参数的同步探测, 进一步获得云体结构图像, 图 10 展示了该探测技术路线图。

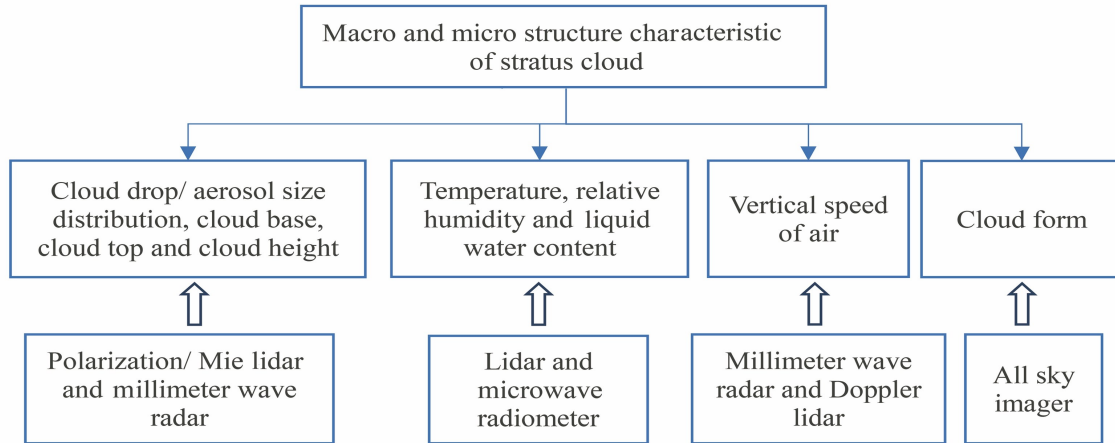


图 10 云宏微观结构探测技术路线图

Fig. 10 Technical roadmap for cloud macro- and micro-structure detection

多种仪器的联合观测与应用, 不仅可以实现探测范围的扩展, 多遥感仪器的数据融合比对还可以在很大程度上提高云参数的探测精度。激光雷达结合其他遥感仪器将是未来云物理探测的主要发展方向。激光雷达技术正处于高速发展时期, 系统稳定性和探测能力也在不断提升, 这些都将是提高激光雷达在云探测研究中的作用和能力。随着激光与光电子技术、大数据与人工智能技术的发展, 面向业务化应用所需的系统稳定性、可靠性及探测能力的激光雷达产品将越来越受到气象与环境领域的行业专家的关注, 并将在云探测领域中发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Fu Y F. Research actuality of remote sensing on cloud precipitation and reflections on summer East Asian cloud precipitation [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2018, 37(6): 493-501.
傅云飞. 云-降水遥感研究现状及夏季东亚云-降水研究思考[J]. *暴雨灾害*, 2018, 37(6): 493-501.
- [2] Guo X L, Fu D H, Hu Z X. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008-2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 351-363.
郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008-2012年)[J]. *大气科学*, 2013,

37(2): 351-363.

- [3] Hua D X, Uchida M, Kobayashi T. Ultraviolet high-spectral-resolution Rayleigh-Mie lidar with a dual-pass Fabry-Perot etalon for measuring atmospheric temperature profiles of the troposphere [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1063-1065.
- [4] Liu Z Y, Kobayashi T. Differential discrimination technique for incoherent Doppler lidar to measure atmospheric wind and backscatter ratio [J]. *Optical Review*, 1996, 3(1): 47-52.
- [5] Sun D S, Zhong Z Q, Zhou J, et al. Accuracy analysis of the Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar [J]. *Optical Review*, 2005, 12(5): 409-414.
- [6] Liu J Q, Chen W B, Hu Q Q. A wind direct-detection Doppler lidar based on a multi-beam Fizeau interferometer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 28(5): 762-770.
刘继桥, 陈卫标, 胡企铨. 基于斐索干涉仪的直接探测多普勒测风激光雷达 [J]. *大气科学*, 2004, 28(5): 762-770.
- [7] Di H G, Wang Q Y, Hua H B, et al. Aerosol microphysical particle parameter inversion and error analysis based on remote sensing data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1753.
- [8] Chen S Y, Wang J Q, Chen H, et al. Lidar cloud detection based on improved simple multiscale method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200379.
陈思颖, 王嘉奇, 陈和, 等. 改进简单多尺度法的激

- 光雷达云检测[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 20200379.
- [9] Mao F Y, Gong W, Li J, et al. Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for Mie lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3097-3102.
毛飞跃, 龚威, 李俊, 等. 基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达云检测与参数反演[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3097-3102.
- [10] Liu Z Y, Omar A H, Hu Y X, et al. CALIOP algorithm theoretical basis document part 3: scene classification algorithms [EB/OL]. (2005-10-18) [2021-01-02]. https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/PC-SCI-202_Part3_v1.0.pdf.
- [11] Sassen K, Petrilla R L. Lidar depolarization from multiple scattering in marine stratus clouds [J]. Applied Optics, 1986, 25(9): 1450-1459.
- [12] Cho H M, Nasiri S L, Yang P. Application of CALIOP measurements to the evaluation of cloud phase derived from MODIS infrared channels [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, 48(10): 2169-2180.
- [13] Lu X M, Jiang Y S. Statistical properties of clouds over Beijing derived from CALIPSO lidar measurements [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(10): 2487-2494.
路小梅, 江月松. 偏振激光雷达探测的北京地区云的统计特性分析[J]. 地球物理学报, 2011, 54(10): 2487-2494.
- [14] Hu Y X, Liu Z Y, Winker D, et al. Simple relation between lidar multiple scattering and depolarization for water clouds[J]. Optics Letters, 2006, 31(12): 1809-1811.
- [15] Hayman M, Spuler S, Morley B, et al. Polarization lidar operation for measuring backscatter phase matrices of oriented scatterers [J]. Optics Express, 2012, 20(28): 29553-29567.
- [16] Choi Y, Lindzen R, Ho C, et al. Space observations of cold-cloud phase change [J]. PNAS, 2010, 107(25): 11211-11216.
- [17] Wang Y F, Gao F, Zhu C X, et al. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0328004.
王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统 [J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0328004.
- [18] Li Z Q. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: an overview [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1): 76-92.
- 李占清. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述 [J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 76-92.
- [19] Duan J, Mao J T. Progress in researches on interaction between aerosol and cloud [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(3): 252-261.
段婧, 毛节奏. 气溶胶与云相互作用的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(3): 252-261.
- [20] Veselovskii I, Kolgotin A, Griaznov V, et al. Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding [J]. Applied Optics, 2002, 41(18): 3685-3699.
- [21] Müller D, Wandinger U, Ansmann A. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: theory [J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2346-2357.
- [22] Chaikovskii A P, Shcherbakov V N. Linear estimate of the parameters of the microstructure of an aerosol from spectral measurements of the characteristics of the scattered radiation [J]. Journal of Applied Spectroscopy, 1985, 42(5): 564-568.
- [23] Donovan D P, Carswell A I. Principal component analysis applied to multiwavelength lidar aerosol backscatter and extinction measurements [J]. Applied Optics, 1997, 36(36): 9406-9424.
- [24] Veselovskii I, Kolgotin A, Griaznov V, et al. Inversion of multiwavelength Raman lidar data for retrieval of bimodal aerosol size distribution [J]. Applied Optics, 2004, 43(5): 1180-1195.
- [25] Tan W S, Zhao G, Yu Y L, et al. Method to retrieve cloud condensation nuclei number concentrations using lidar measurements [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(7): 3825-3839.
- [26] Lü M, Wang Z E, Li Z Q, et al. Retrieval of cloud condensation nuclei number concentration profiles from lidar extinction and backscatter data [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(11): 6082-6098.
- [27] Shan K L, Liu X B, Bu L B, et al. Joint inversion method of cirrus physical properties using both lidar and millimeter wave radar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2742-2746.
单坤玲, 刘新波, 卜令兵, 等. 激光雷达和毫米波雷达的卷云微物理特性的联合反演方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2742-2746.
- [28] Wang Z E, Sassen K. Cirrus cloud microphysical property retrieval using lidar and radar measurements. Part I: algorithm description and comparison with *in situ* data [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(3): 218-229.
- [29] Wang Z E, Sassen K. Cirrus cloud microphysical

- property retrieval using lidar and radar measurements. Part II: midlatitude cirrus microphysical and radiative properties[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(14): 2291-2302.
- [30] Mao J T, Zheng G G. Discussions on some weather modification issues [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(5): 643-646.
毛节泰, 郑国光. 对人工影响天气若干问题的探讨 [J]. *应用气象学报*, 2006, 17(5): 643-646.
- [31] Behrendt A, Reichardt J. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1372-1378.
- [32] Wu D C, Wang Z E, Wechsler P, et al. Airborne compact rotational Raman lidar for temperature measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): A1210-A1223.
- [33] Su J, McCormick M P, Wu Y H, et al. Cloud temperature measurement using rotational Raman lidar[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 125: 45-50.
- [34] Liu B, Wang Z, Cai Y, et al. Compact airborne Raman lidar for profiling aerosol, water vapor and clouds[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20613-20621.
- [35] Wu S H, Dai G Y, Song X Q, et al. Observations of water vapor mixing ratio profile and flux in the Tibetan Plateau based on the lidar technique [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(3): 1399-1413.
- [36] Liu F C, Yi F. Spectrally resolved Raman lidar measurements of gaseous and liquid water in the atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(28): 6884-6895.
- [37] Wang Y F, Wang Q, Hua D X. Preliminary exploration of atmospheric water vapor, liquid water and ice water by ultraviolet Raman lidar[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36311-36328.
- [38] Träumner K, Handwerker J, Wieser A, et al. A synergy approach to estimate properties of raindrop size distributions using a Doppler lidar and cloud radar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(6): 1095-1100.
- [39] Wei T W, Xia H Y. Simultaneous wind and rainfall detection using coherent Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200406.
魏天问, 夏海云. 基于相干多普勒激光雷达的风雨同时探测 [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S2): 20200406.
- [40] Lottman B T, Frehlich R G, Hannon and S M, et al. Evaluation of vertical winds near and inside a cloud deck using coherent Doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(8): 1377-1386.