

# 多功能大气探测激光雷达应用

刘博铭<sup>1</sup>, 马盈盈<sup>1,2</sup>, 龚威<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 激光雷达具有高的时间和空间分辨率、优越的方向性和相干性、高的探测精度和实时快速的数据获取能力, 已经被广泛应用于大气探测、环境监测等领域。随着技术的发展, 大气探测激光雷达由最初单波长、单功能朝着多波长、多功能方向发展, 技术更加成熟, 操作更加方便。本文将介绍大气探测激光雷达的基本原理, 及其在探测大气气溶胶和云、水汽、温度、污染物和大气边界层高度等方面的数据应用。最后, 对多波长多功能大气探测激光雷达的数据应用发展进行了总结和展望。

**关键词:** 大气探测激光雷达; 气溶胶; 云; 米散射; 大气边界层

**中图分类号:** TN 958.98

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.05.020

## Application of Multi-functional Atmospheric Detection Lidar

LIU Boming<sup>1</sup>, MA Yingying<sup>1,2</sup>, GONG Wei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing (LIESMARS),

Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China;

2. Collaborative Innovation Centre for Geospatial Technology, Wuhan 430079, Hubei, China)

**Abstract:** Lidar has been widely used in the fields such as atmospheric detection and environmental monitoring due to its high temporal and spatial resolution, superior directionality and coherence, high detection accuracy, and fast real-time data acquisition capability. With the development of technology, atmospheric detection lidar is developing from single-wavelength and single-function to multi-wavelength and multi-function. The technology is more mature, and the operation is more convenient. In this paper, the basic principles of atmospheric detection lidar and its application in the detection of atmospheric aerosols and clouds, water vapor, temperature, pollutants, and atmospheric boundary layer height are introduced. The development and application of data obtained by multi-wavelength and multi-function atmospheric detection lidar are summarized and prospected.

**Key words:** atmospheric detection lidar; aerosol; cloud; mie-scattering; atmospheric boundary layer

## 0 引言

近年来, 随着中国经济的快速发展和人民生活水平的提高, 人为排放量急剧增加, 导致了大气中的气溶胶含量急剧上升<sup>[1-4]</sup>。气溶胶通过散射和吸收太阳辐射以及改变云的辐射特性来改变大气辐射收支, 进而影响全球和区域气候变化<sup>[4-10]</sup>。同时, 气溶胶含量的上升也会造成区域环境变化, 导致沙

尘暴和雾霾的产生<sup>[11-15]</sup>。气溶胶还可能导致健康问题, 大气中的细颗粒污染物进入人体的呼吸系统和血管系统, 会对人体健康产生不利影响<sup>[16]</sup>。因此, 对大气气溶胶光学和物理特性的研究至关重要。

大气探测激光雷达具有较高的空间和时间分辨率, 可以长期连续地监测污染物的垂直分布, 已在世界范围内得到了广泛应用<sup>[17-20]</sup>。最早的大气探

收稿日期: 2019-02-20; 修回日期: 2019-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(2017YFC0212600)

作者简介: 刘博铭(1993—), 男, 博士, 主要研究方向为激光遥感系统集成方法和卫星遥感数据科学应用研究。

通信作者: 马盈盈(1982—), 女, 博士, 主要研究方向为星载大气探测激光雷达的数据处理和反演算法研究。

测激光雷达是美国学者 FIOCCO 等<sup>[21]</sup>于 1963 年研制的世界首台红宝石米散射激光雷达;同年 LIGDA<sup>[22]</sup>也研制了一台红宝石米散射激光雷达,主要进行对流层的大气探测。随后国内外学者开始陆续开展了大气探测激光雷达的研制工作,如日本学者 IWASAKA 等<sup>[23]</sup>利用偏振激光雷达对火山灰气溶胶进行探测,并研究了其对日本大气的影响;美国学者 SCHOTLAND 等<sup>[24]</sup>和 SASSEN 等<sup>[25]</sup>在利用偏振激光雷达研究了不同形态的云的光学和物理特性;德国学者 MÜLLER 等<sup>[26-28]</sup>研制出多波长高光谱分辨激光雷达,用于气溶胶粒径谱分布的反演;俄罗斯学者 VESELOVSKII 等<sup>[29-31]</sup>也使用多波长拉曼激光雷达对气溶胶粒径谱进行研究。国内的大气探测激光雷达研制工作最早开始于 1966 年,由中国科学院大气所与中国科学院上海光机所共同研发出我国首台红宝石米散射激光雷达<sup>[32]</sup>;随后多家单位也开展了大气探测激光雷达的相关工作,如中科院大气所吕达仁院士等<sup>[33]</sup>使用红宝石激光雷达对底层大气消光系数进行探测;中国科学院安徽光机所的胡欢陵和周军等相继研制出米散射激光雷达<sup>[34-35]</sup>,用于对流层大气污染物和气溶胶的垂直分布观测;其同事刘东和谢晨波等<sup>[36-38]</sup>研制出多波长拉曼激光雷达,应用于卷云的光学特性观测;北方民族大学毛建东等<sup>[39]</sup>开发了一套小型米散射激光雷达系统,用于大气气溶胶光学特性和水平能见度测量;西安理工大学闫庆和华灯鑫等<sup>[40-42]</sup>开发出多种大气探测激光雷达,用于大气气溶胶及云的精确探测;兰州大学黄建平、黄忠伟和周天等<sup>[43-44]</sup>基于激光雷达研究了西北地区沙尘气溶胶的特性;武汉大学龚威和李俊等<sup>[45-46]</sup>开发出了双视场激光雷达系统,用于长期观察武汉区域灰霾污染;中国科学院物数所龚顺生和李发泉等<sup>[47-48]</sup>研发了一套共振荧光激光雷达,并用该雷达观测了武汉地区的钠层;中科院上海光机所刘金涛等<sup>[49]</sup>提出一套用测量大气风和气溶胶的高谱分辨激光雷达(HSRL)系统;刘继桥等<sup>[50]</sup>提出基于斐索(Fizeau)干涉仪的多普勒激光雷达技术;中国海洋大学吴松华等<sup>[51-52]</sup>研制出多普勒测风激光雷达,用于大气风场的精细测量;浙江大学刘东等<sup>[53]</sup>研制出基于马克尔逊干涉仪的高谱分辨激光雷达,用于大气气溶胶的观测研究。自激光雷达系统问世以来,已经被广泛应用于大气探测、环境监测等领域<sup>[54-58]</sup>。

早期的单波长激光雷达,可检测大气气溶胶和

云的光学特性,如气溶胶消光系数、后向散射系数和光学厚度,以及大气边界层高度、云底和云顶高等基本参数<sup>[59-73]</sup>。随着多波长偏振技术提出之后,多波长偏振激光雷达系统被应用于大气探测领域中。除了观测大气气溶胶和云的光学特性外,还可以观测到大气气溶胶和云的简单物理特性,如粒子大小和粒子形状等<sup>[74-81]</sup>。而今随着硬件技术的快速发展,各种多波长多功能的激光雷达系统也被投入环境监测领域中,如多波长偏振拉曼-米激光雷达、多波长高光谱分辨率激光雷达等<sup>[82-83]</sup>。由于可以同时获取多个波段的信息,可以通过数学物理的方法,进一步去反演大气气溶胶和云的粒径谱分布、复折射指数和相函数等参数<sup>[84-87]</sup>。此外,通过拉曼散射的信号,还可以反演出大气温度和湿度的垂直廓线<sup>[88-101]</sup>。总的来说,大气探测激光雷达可以有效地检测出污染物特性和传输过程,对大气温度和湿度的变化进行观测,为全球以及区域气候变化和大气模型的研究提供基础数据支持<sup>[102-104]</sup>。

目前,我国自主研制的星载多波长高光谱分辨率激光雷达即将发射,它可以提供全球范围内的大气气溶胶的垂直廓线,并用来反演气溶胶的光学和物理特性。这些信息在污染物传输和数值天气预报方面有着十分重要的应用前景。本文基于地基观测数据,主要简述多波长偏振激光雷达在大气气溶胶和气象要素探测中的应用,为之后的星载多波长高光谱分辨率激光雷达数据处理算法提供参考。

## 1 多波长偏振技术

### 1.1 大气散射理论

激光雷达进行大气探测时,激光脉冲与大气中的气溶胶粒子、大气分子和原子发生多种物理机制的相互作用,使激光在大气传播的能量和回波信号的能量强度或波长发生改变,对这些改变的信息进行观测、分析、反演,就能得到大气中成分的相关信息<sup>[60-62]</sup>。激光与大气的主要作用机理包括反射、折射、吸收、各种散射和诱导荧光等各种光学现象<sup>[63-65]</sup>。采用多波长激光雷达系统探测大气气溶胶时,主要考虑两种散射机制——米散射和拉曼散射。

米(Mie)散射<sup>[11-12]</sup>是指当粒子尺度接近或大于入射光波长时,其散射的光强在各方向是不对称

的,其中大部分入射光线沿着前进方向进行散射的现象,如图 1 所示。大气气溶胶粒子对入射光的散射强度具有方向性,向前和向后的散射都比较强,向侧面的散射比较弱。发生米散射的大气成分主要是大气中尺寸较大的气溶胶粒子和云,以及大气污染物等。米散射属于弹性散射,因此,入射光与散射光的波长一致。由于米散射的散射截面较大,所以接收米散射的后向散射信号时,回波信号比较强。

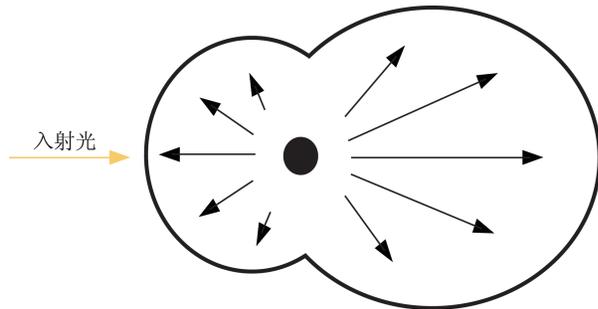


图 1 大粒子散射分布图

Fig.1 Scattering distribution of large particles

拉曼(Raman)散射指的是激光射入大气后,大气中的氮气(N<sub>2</sub>)、氧气(O<sub>2</sub>)、水汽(H<sub>2</sub>O)等大气分子会产生振动和转动拉曼散射<sup>[91-95]</sup>。拉曼散射是指大气分子中的电子吸收光子并到达高能级,由于分子的振动或者转动,电子跃迁不会回到原来的能级。因此,产生的散射光频率不等于入射激光的频率,而且频移量跟分子的能级结构也就是说与分子种类有关。拉曼激光雷达可以用于大气温度、水汽含量垂直分布的测量。

## 1.2 偏振技术

偏振技术是指在雷达的接收系统中加入了检偏棱镜<sup>[74-75]</sup>。一种的检测偏振态的分光装置如图 2 所示。当回波信号经过检偏器后,光信号被检偏器划分为两个偏振方向,一个是方向与发射激光偏振方向平行的 P 通道,另一个是方向与发射激光偏振方向相垂直的 S 通道。之后两个通道的光信号分别经过探测和采集,最后进入计算机处理系统。

## 2 激光雷达系统数据应用

多波长偏振激光雷达在大气污染物探测中具有广泛的应用,可以准确地获取大气气溶胶的光学

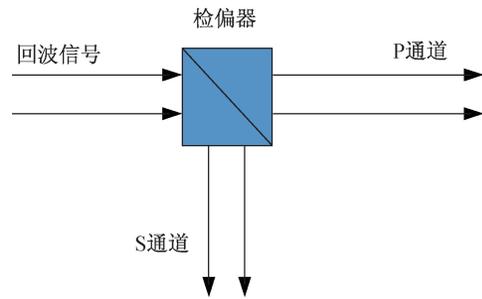


图 2 检偏器示意图

Fig.2 Schematic diagram of the analyzer

和物理参数,以及大气气象参数等。下面将详细介绍激光雷达系统在污染监测中的数据应用。

### 2.1 气溶胶光学特性探测

首先,通过激光雷达系统数据可以反演相应波段的气溶胶的光学特性,包括气溶胶消光系数、气溶胶后向散射系数和气溶胶光学厚度(AOD)等。通过激光雷达数据反演得到的气溶胶消光系数和光学厚度等参数,可以直接表征大气状态,得到大气污染程度,并已经得到国内外学者的广泛应用。中国科学院安徽光机所的吴德承等<sup>[59]</sup>利用激光雷达对合肥地区对流层的气溶胶光学特性进行了长期观察。兰州大学黄忠伟等<sup>[60]</sup>利用三台激光雷达联合观测了沙尘的光学特性。美国学者 HAIR 等<sup>[61]</sup>采用高光谱分辨激光雷达研究了气溶胶的光学特性等。

激光雷达系统接收到大气散射的回波信号后,可以通过 Fernald 法<sup>[102-103]</sup>计算出垂直方向上大气气溶胶的消光系数和后向散射系数,同时对垂直方向上的消光系数进行积分,可以得到气溶胶光学厚度。气溶胶消光系数是指大气气溶胶对光的消散作用,气溶胶浓度越大,对光的消散作用越明显。光学厚度是指光在传输路径上的总衰弱。

图 3(a)为 532 nm 波段的气溶胶消光系数的垂直分布。图中颜色越红表示消光系数值越大,颜色越蓝代表消光系数越小。从图 3 中可以看出,大气气溶胶主要分布在 0~1 km 的高度上。而且越接近地表,气溶胶的浓度越大。在 0~500 m 高度上,气溶胶的消光系数均大于  $0.3 \text{ km}^{-1}$ 。图 3(b)表示的是 532 nm 波段气溶胶光学厚度随时间的变化趋势。可以发现,当晚气溶胶的光学厚度在 0.4~0.6 内变化。

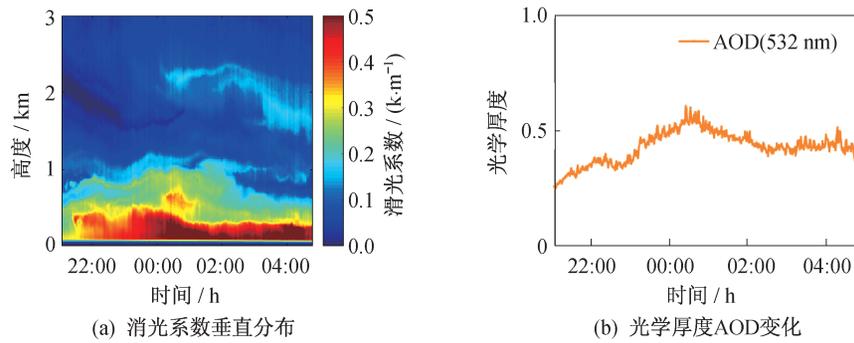


图 3 气溶胶光学特性参数的垂直分布

Fig.3 Vertical distribution of the optical properties of aerosols

## 2.2 气溶胶物理特性探测

多波长偏振激光雷达系统还可以观测气溶胶的物理特性,包括气溶胶色比、气溶胶退偏比、大气边界层高度,以及气溶胶粒径谱分布等信息。国内外已有许多对气溶胶色比和退偏比的观测研究。日本学者 SUGIMOTO 等<sup>[75]</sup>使用双波长偏振激光雷达观测了西北太平洋上空的沙尘和人为气溶胶;德国学者 FREUDENTHALER 等<sup>[76]</sup>使用多波长偏振激光雷达研究了撒哈拉沙尘的退偏比;武汉大学刘博铭等<sup>[77]</sup>使用双波长偏振激光雷达对武汉地区气溶胶色比和退偏进行了长期观测;周天等<sup>[78]</sup>使用星载激光雷达 CAILPSO 对塔克拉玛干地区沙尘进

行了研究。

气溶胶色比表示不同波段的气溶胶后向散射系数的比值,色比反映了被测颗粒的大小,色比值越大,颗粒越大。气溶胶退偏比表示同一波段垂直通道的后向散射系数与平行通道的后向散射系数的比值,它反映了被测颗粒的形状特征,退偏比越大,颗粒越不规则。图 4(a)为 532 nm 波段的后向散射系数与 355 nm 波段的后向散射系数的色比值。图 4 中颜色越红表示色比值越大,颜色越蓝代表色比值越小。图 4(b)为激光雷达系统反演得到的 532 nm 波段气溶胶退偏比的垂直分布。由于沙尘和冰晶粒子的形状不规则度高,所以退偏比通常用于区别沙尘和冰晶粒子。

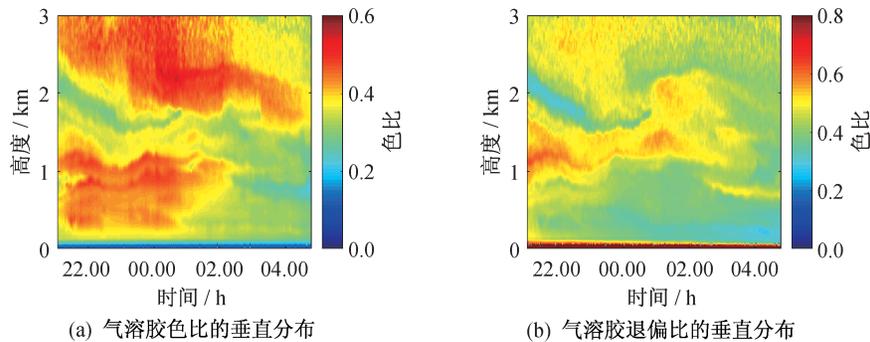


图 4 气溶胶物理特性参数的垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of the physical property parameters of aerosols

对于大气边界层高度查找的问题,传统边界层高度算法有梯度法、小波法等<sup>[65-66]</sup>,根据气溶胶的垂直廓线,反演大气边界层高度。这是由于边界层上下气溶胶浓度存在明显差异,因此,气溶胶垂直廓线在边界层顶处存在一个显著的梯度变化,可以通过梯度查找来确定边界层高度。但是由于大气状态是不断变化的,边界层顶部存在残余层,残余

层引起的梯度变化会影响大气边界层高度的反演。为了克服残余层的影响,国内外学者进行了深入研究。兰州大学的王珍珠等<sup>[67]</sup>提出了改进的小波变换法来反演边界层高度,以避免夹卷层的影响;荷兰学者 BRUINE 等<sup>[68]</sup>发展了一种图像算法来反演边界层高度;法国学者 PAL 等<sup>[69]</sup>提出基于地球物理过程的技术来反演边界层高度。此外,还可以发

挥多波长激光雷达的优势,采用双波长算法<sup>[70-73]</sup>,引入色比和退偏比信息,通过区分气溶胶层和自由大气来查找边界层高度。如图 5 所示,不同大气条件下,边界层高度反演算法的结果对比。黑色点表示梯度法的结果,红色点表示双波长算法的结果。图 5(a)表示稳定大气条件下,可以发现当大气处

于稳定状态时,不存在残余层,此时两种算法的结果是一致的。而在不稳定大气条件下,如图 5(b)所示,当有残余层存在时,梯度法会将残余层顶部误判为边界层顶,导致边界层高度反演结果偏高。而双波长算法依然可以很好地查找到边界层顶部。

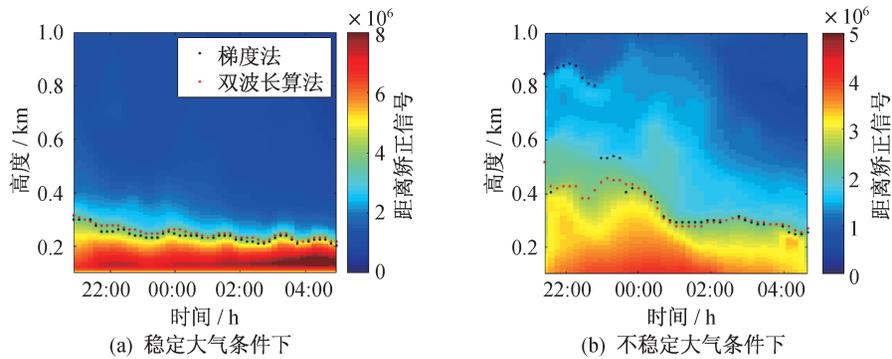


图 5 不同大气条件下,边界层高度查找算法结果对比

Fig.5 Comparison of boundary layer height by different algorithms under different atmospheric conditions

多波长偏振激光雷达可以提供多个波段的气溶胶消光系数和后向散射系数,因此,还可以用来反演气溶胶粒径谱分布。目前国内外在激光雷达反演粒径谱的主流方法是采用多波长激光雷达信号,使用正则化的方法反演出粒径谱。正则化反演大气参数的理论体系最早由德国人 MÜLLER<sup>[26]</sup>于 1999 年提出,他发展了针对 6 波段激光雷达(355 nm、400 nm、532 nm、710 nm、800 nm、1 064 nm)的正则化多元大气参数反演算法。近年来经历了数次改进和技术突破,正则化算法作为多波长激光雷达反演多元大气参数的整体框架是被认可的。随着激光雷达技术的发展,越来越多的学者尝试使用激光雷达研究大气粒子的粒径谱垂直分布问题。西安理工大学狄慧鸽等<sup>[84]</sup>采用两个波段的消光信号和三个波段的后向散射系数反演气溶胶粒径谱的垂直分布;俄罗斯学者 VESELOVSKII 等<sup>[31]</sup>采用两个波段的消光信号和六个波段的后向散射系数来反演气溶胶粒径谱分布。这些研究表明,激光雷达反演粒径谱最少需要两个波段的消光信号和三个波段的后向散射系数,而且需要它们是非线性关系的。因此,可以使用多波长拉曼激光雷达或多波长高光谱分辨激光雷达对大气气溶胶粒径谱分布进行探测。它们都可以提供非线性关系的气溶胶消光系数和后向散射系数。同时由于每个波长对应

的粒子尺度波峰是不一致的(如:在 355 nm、532 nm 和 1 064 nm 波段的消光效率对应的最大直径分别为  $\sim 0.48 \mu\text{m}$ 、 $\sim 0.64 \mu\text{m}$  和  $\sim 1.46 \mu\text{m}$ ,而反向散射效率对应的峰值为  $\sim 0.92 \mu\text{m}$ 、 $\sim 1.38 \mu\text{m}$  和  $\sim 2.76 \mu\text{m}$ ),这说明波长信息数量越多,对粒径谱的反演效果越好。如图 6(a)所示,表示反演粒径谱分布的基函数曲线,当激光雷达波段数越多时,可以获得的基函数曲线数量就越多。通过正则化算法,可以完整地重建出不同高度上大气气溶胶的粒径谱分布,如图 6(b)所示。

### 2.3 气象要素探测

激光与大气物质作用时,还会发生拉曼散射。散射光波的频移量跟分子的能级结构也就是与分子种类有关,因此,多波长拉曼激光雷达系统可以实现大气温度、水汽密度的测量。在探测大气水汽方面,德国学者 GERDING 等<sup>[88]</sup>在北极高纬度地区通过激光雷达探测对流层水汽;西安理工大学王玉峰等<sup>[89]</sup>使用拉曼激光雷达观测了西安地区的大气水汽;武汉大学王威等<sup>[90]</sup>在武汉地区对大气水汽进行了长期观测。水汽含量的垂直分布图如图 7 所示。图中颜色越深表示水汽含量越大,颜色越浅说明水汽含量越小,可以发现水汽一般集中在 1.5 km 以下。

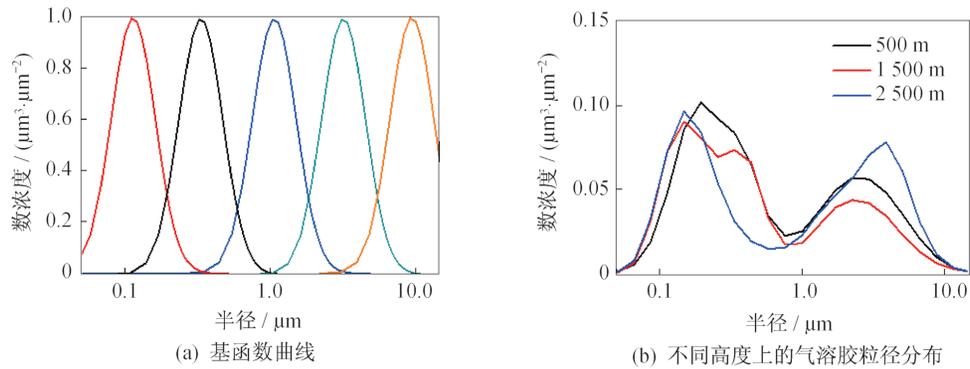


图 6 气溶胶粒径谱分布反演

Fig. 6 Inversion of the particle size distribution of aerosols

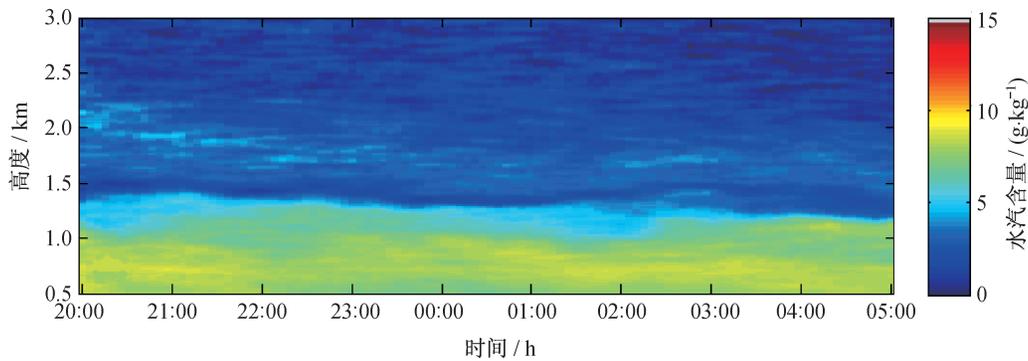


图 7 水气的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of water vapor

此外,还有许多关于多波长拉曼激光雷达系统探测大气温度的研究。中国科学院武汉物理与数学研究所李亚娟等<sup>[91]</sup>和中国科学院安徽光机所刘玉丽等<sup>[92]</sup>基于纯转动拉曼激光雷达对大气温度进行高精度的探测;保加利亚学者 ARSHINOV 等<sup>[100]</sup>和 VAUGHAN 等<sup>[101]</sup>也利用拉曼激光雷达对大气温度进行探测。

### 3 结束语

大气探测激光雷达在大气探测和环境监测方面有着十分显著的作用。本文介绍了多波长多功能大气探测激光雷达的数据应用,可用来获取大气气溶胶和云的光学和物理特性。如气溶胶消光系数、后向散射系数和光学厚度等光学特性,还有气溶胶色比、退偏比、粒径谱分布和复折射指数等微物理特性。此外,还可以探测大气边界垂直结构、大气湿度和温度廓线等参数。随着硬件技术的发展,激光雷达技术日新月异,各类新型激光雷达在全球范围内得到了广泛的应用。全球已经组建了

许多地基激光雷达观测网络,而且世界上的航空大国都在积极进行星载激光雷达计划。利用地基网络和卫星平台的空间覆盖大的特点,极大提升了垂直探测的能力,得到大气资料的三维信息。但是在多波长多功能激光雷达数据处理算法上,还需要进一步挖掘。要充分地使用多个波段的回波信息和新的数学物理算法来反演更多的大气参数,为污染物传输、气候模式和数据同化等研究提供更可靠的数据支持。

### 参考文献

- [1] KAUFMAN Y J, TANRE D, BOUCHER O. A satellite view of aerosols in the climate system [J]. *Nature*, 2002, 419: 215-224.
- [2] LI W J, SHAO L Y, BUSECK P R. Haze types in Beijing and the influence of agricultural biomass burning [J]. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10(17): 8119-8130.
- [3] LI J, WANG Z, HUANG H, et al. Assessing the effects of trans-boundary aerosol transport between various city clusters on regional haze episodes in spring

- over East China [J]. *Tellus B*, 2013, 65: 1-7.
- [ 4 ] SUN Y L, WANG Z F, FU P Q, et al. Aerosol composition, sources and processes during wintertime in Beijing, China [J]. *Atmos Chem Phys* 2013, 13 (9): 4577-4592.
- [ 5 ] QIN W, LIU Y, WANG L, et al Analysis of atmospheric turbidity in clear skies at Wuhan, China Central [J]. *Journal of Earth Science*, 2017, 28(4) : 729-738.
- [ 6 ] WANG L C, KISI O, ZOUNEMAT-KERMANI M, et al. Solar radiation prediction using different techniques: model evaluation and comparison [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 61: 384-397.
- [ 7 ] LIU B M, MA Y Y, GUO J P, et al. Boundary layer heights as derived from ground-based Radar wind profiler in Beijing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(10): 8095-8104.
- [ 8 ] LIU B M, GUO J P, GONG W, et al. Boundary layer height as estimated from radar wind profilers in four cities in china: relative contributions from aerosols and surface features [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(10) : 1657.
- [ 9 ] SHI Y F, LIU B M, CHEN S H, et al. Characteristics of aerosol within the nocturnal residual layer and its effects on surface PM<sub>2.5</sub> over China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 241: 117841.
- [10] LIU B M, MA Y Y, SHI Y F, et al. The characteristics and sources of the aerosols within the nocturnal residual layer over Wuhan, China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 241: 104959.
- [11] YU L, ZHANG M, WANG L, et al. Aerosol radiative effects from observations and modeling over the Yangtze River Basin, China from 2001 to 2015[J]. *International Journal of Climatology*, 2019.
- [12] ZHANG M, MA Y, GONG W, et al. Aerosol radiative effect in UV, VIS, NIR, and SW spectra under haze and high-humidity urban conditions [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 166: 9-21.
- [13] LIU B. Surface aerosol optical properties during high and low pollution periods at an urban site in central China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, 18: 3035-3046.
- [14] LI Z, LI C, CHEN H, et al. East asian studies of tropospheric aerosols and their impact on regional climate (EAST-AIRC) : an overview [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2011, 116 (D7):1-15.
- [15] LIU B, MA Y, GONG W, et al. Study of continuous air pollution in winter over Wuhan based on ground-based and satellite observations [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(1): 156-165.
- [16] GONG C, XIN J, WANG S, et al. Anthropogenic aerosol optical and radiative properties in the typical urban/suburban regions in China [J]. *Atmos Res*, 2017, 197: 177-187.
- [17] 田晓敏,刘东,徐继伟,等.大气探测激光雷达技术综述[J].*大气与环境光学学报*,2018,13(5):321.
- [18] 华灯鑫,宋小全.先进激光雷达探测技术研究进展[J].*红外与激光工程*,2008,37(增刊1):21-27.
- [19] 刘东,杨雨英,周雨迪,等.大气遥感高光谱分辨率激光雷达研究进展[J].*红外与激光工程*,2015,44(9) : 2535-2546.
- [20] 田晓敏,刘东,徐继伟,等.大气探测激光雷达网络和星载激光雷达技术综述[J].*大气与环境光学学报*,2018, 13(6):401.
- [21] FIOCCO G, SMULLIN L D. Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60-140 km) by optical radar [J]. *Nature*, 1963, 199(4900): 1275.
- [22] LIGDA M G H. Meteorological observations with pulsed laser radar[C]// *Proceedings 1st Conference on Laser Technology*. 1963: 63-72.
- [23] IWASAKA Y, HAYASHIDA S. The effects of the volcanic eruption of St. Helens on the polarization properties of stratospheric aerosols: lidar measurement at Nagoya [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan: Ser II*, 1981, 59(4): 611-614.
- [24] SCHOTLAND R M, KENNETH S, RICHARD S. Observations by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1971, 10(5): 1011-1017.
- [25] SASSEN K. The polarization lidar technique for cloud research; a review and current assessment [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1991, 72 (12): 1848-1866.
- [26] MÜLLER D, WAGNER F. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: theory [J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (12): 2346-2357.
- [27] MÜLLER D, WAGNER F. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: simulation [J]. *Applied*

- Optics, 1999, 38 (12): 2358-2368.
- [28] MÜLLER D, WAGNER F, WANDINGER U, et al. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: experiment [J]. Applied Optics, 2000, 39 (12): 1879-1892.
- [29] 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.
- [30] VESELOVSKII I, KOLGOTIN A, GRIAZNOV V, et al. Retrieval of optical and physical properties of African dust from multiwavelength Raman lidar measurements during the SHADOW campaign in Senegal [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16 (11): 7013.
- [31] VESELOVSKII I, KOLGOTIN A, GRIAZNOV V, et al. Linear estimation of particle bulk parameters from multi-wavelength lidar measurements [J]. Atmos Meas Tech, 2012, 5: 1135-1145.
- [32] 王青梅,张以谟.气象激光雷达的发展现状[J].气象科技,2006,34(3):246-249.
- [33] 吕达仁,魏重,林海,等.低层大气消光系数分布的激光探测[J].大气科学,1977,13:199-205.
- [34] 周军,岳古明,金传佳,等.探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达[J].光学学报,2000,20(10):1412-1417.
- [35] 王英俭,胡顺星,周军,等.激光雷达大气参数测量[M].北京:科学出版社,2014.
- [36] 刘东,陶宗明,吴德成,等.三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J].光学学报,2012,33(2):0228001.
- [37] 刘东,戚福弟,金传佳,等.合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测[J].大气科学,2003,27(6):1093-1100.
- [38] 谢晨波,周军,岳古明,等.新型车载式拉曼激光雷达测量对流层水汽[J].光学学报,2006,26(9):1281-1286.
- [39] 毛建东,华灯鑫,何廷尧.小型米散射激光雷达的研制及其探测[J].光子学报,2010,39(2):284-288.
- [40] 闫庆,华灯鑫,李仕春,等.微脉冲米散射激光雷达系统的产品化研发及实验观测研究[J].量子电子学报,2013,30(1):123-128.
- [41] 华灯鑫,刘君.气象与大气环境观测拉曼散射激光雷达系统:200610105193.2 [P].2007-06-27.
- [42] 刘君,华灯鑫,李言,等.小型米散射激光雷达系统设计[J].西安理工大学学报,2007,23(1):1-5.
- [43] 黄建平.激光雷达对气溶胶和云辐射效应的探测研究[C]//全国光电技术学术交流会.2012:64-65.
- [44] 周天,黄忠伟,黄建平,等.黄土高原地区云垂直结构的激光雷达遥感研究[J].干旱气象,2013,31(2):7-9.
- [45] WEI G, LIU B, MA Y, et al. Mie LIDAR observations of tropospheric aerosol over Wuhan [J]. Atmosphere 2015, 6(8): 1129-1140.
- [46] ANSMANN A, RIEBESELL M, WANDINGER U, et al. Combined raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio [J]. Appl Phys B, 1992, 55: 18-28.
- [47] 龚顺生,曾锡之.中国武汉上空钠层的首次激光雷达观测[J].中国科学:数学,1997,40(4):369-373.
- [48] 程学武,龚顺生,李发泉,等.武汉高空钠层的激光雷达24 h连续观测[J].中国科学:物理学力学天文学,2007,37(2):196-201.
- [49] 刘金涛,陈卫标,刘智深.高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究[J].大气科学,2003,27(1):115-122.
- [50] 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.
- [51] 吴松华.高稳定性高光谱分辨率激光测风系统关键技术[D].青岛:中国海洋大学,2004.
- [52] 冯长中,吴松华,刘秉义.相干多普勒激光雷达风场反演方法研究与实验印证[J].中国激光,2018,45(4):303-311.
- [53] 黄寒璐,刘东,杨甬英,等.基于视场展宽迈克尔孙干涉仪的高光谱分辨率激光雷达滤光器设计研究[J].中国激光,2014,41(9):251-258.
- [54] 刘东.基于高光谱分辨率激光雷达的大气气溶胶类型识别关键技术:大气专项聚焦污染成因激光雷达遥测雾霾来源[J].中国科技成果,2016,17(24):10-11.
- [55] 尹青,何金海,张华.激光雷达在气象和大气环境监测中的应用[J].气象与环境学报,2009,25(5):48-56.
- [56] 程学武,杨国销,杨男,等.高空Na层、钾层同时探测的激光雷达[J].中国激光,2011,38(2):233-237.
- [57] 于海利,胡顺星,吴晓庆,等.拉曼激光雷达探测低对流层大气二氧化碳分布[J].光学学报,2012,32(8):21-26.
- [58] 胡顺星,赵培涛,汪少林,等.ARL-1Raman激光雷达系统探测大气二氧化碳[J].大气与环境光学学报,2009,4(6):401-405.
- [59] WU D, ZHOU J, LIU D. et al. 12-year LIDAR

- observations of tropospheric aerosol over Hefei (31.9 N, 117.2 E), China [J]. *J Opt Soc Korea*, 2011, 15: 90-95.
- [60] HUANG Z, HUANG J. Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-US joint dust field experiment [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2010, 115(D7):136-148.
- [61] HAIR J W, HOSTETLER C A, COOK A L, et al. Airborne high spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties [J]. *Applied optics*, 2008, 47 (36): 6734-6752.
- [62] 陈敏,孙东松,李洪敬,等.激光雷达斜程能见度的一种探测方法及其分析[J].*红外与激光工程*,2006,35(2): 156-160.
- [63] 宋小全,刘智深,贺岩,等.白天工作条件下大气激光雷达探测的实验研究[J].*青岛海洋大学学报*,2001,31 (4):593-599.
- [64] 宋小全,郭金家,闫召爱,等.大气气溶胶光学参数的高光谱分辨率激光雷达探测研究[J].*自然科学进展*, 2008,18(9):1009-1015.
- [65] HAYDEN K L, ANLAUF K G, HOFF R M, et al. The vertical chemical and meteorological structure of the boundary layer in the lower Fraser valley during Pacific 93 [J]. *Atmos Environ*, 1997, 31(14): 2089-2105.
- [66] BROOKS I M. Finding boundary layer top: application of a wavelet covariance transform to lidar backscatter profiles[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2003, 20: 1092-1105.
- [67] WANG Z, CAO X, ZHANG L, et al. Lidar measurement of planetary boundary layer height and comparison with microwave profiling radiometer observation [J]. *Atmos Meas Tech*, 2012, 5 (8) : 1965-1972.
- [68] BRUINE M D, APITULEY A, DONOVAN D, et al. Pathfinder: applying graph theory for consistent tracking of daytime mixed layer height with backscatter lidar [J]. *Atmos Meas Tech*, 2017, 10: 1893-1909.
- [69] PAL S, HAEFFELIN M, BATCHVAROVA E. Exploring a geophysical process-based attribution technique for the determination of the atmospheric boundary layer depth using aerosol lidar and near-surface meteorological measurements [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118 (16): 9277-9295.
- [70] LIU B, MA Y, GONG W, et al. Two-wavelength lidar inversion algorithm for determining planetary boundary layer height [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2018, 206: 117-124.
- [71] LIU B, MA Y, GONG W, et al. Graphics algorithm for deriving atmospheric boundary layer heights from CALIPSO data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11 (9): 5075-5085.
- [72] LIU B, MA Y, GONG W, et al. Improved two-wavelength Lidar algorithm for retrieving atmospheric boundary layer height [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 55-61.
- [73] LIU B, MA Y, GONG W, et al. Determination of boundary layer top on the basis of the characteristics of atmospheric particles [J]. *Atmos Environ*, 2018, 178: 140-147.
- [74] SUGIMOTO N. Observation of aerosols and clouds using a two-wavelength polarization lidar during the Nauru99 experiment [J]. *Sea Sky*, 2000, 76: 90-95.
- [75] SUGIMOTO N, MATSUI I, SHIMIZU A, et al. Observation of dust and anthropogenic aerosol plumes in the Northwest Pacific with a two-wavelength polarization lidar on board the research vessel Mirai [J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29 (19): 1-7.
- [76] FREUDENTHALER V, ESSELBORN M, WIEGNER M, et al. Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006 [J]. *Tellus Ser B: Chemical Phys Meteorol*, 2009, 61 (1): 165-179.
- [77] LIU B, MA Y, GONG W, et al. Observations of aerosol color ratio and depolarization ratio over Wuhan [J]. *Atmos Pollut Res*, 2017, 8 (6): 1113-1122.
- [78] IWASAKA Y, SHIBATA T, NAGATANI T, et al. Large depolarization ratio of free tropospheric aerosols over the Taklamakan Desert revealed by lidar measurements; possible diffusion and transport of dust particles [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2003, 108 (23) : 3047-3049.
- [79] ZHOU T, HUANG J P, HUANG Z W, et al. The depolarization-attenuated backscatter relationship for dust plumes [J]. *Opt Express*, 2013, 21 (13): 15195-15204.
- [80] CHIANG C W, DAS S K, NEE J B, et al. Lidar depolarization measurements for aerosol source and property studies over Chungli (24.58 N, 121.1E) [J]. *Atmos Res*, 2008, 90 (24): 203-210.
- [81] HAARIG M, ALTHAUSEN D, ANSMANN A,

- et al. Measurement of the linear depolarization ratio of aged dust at three wavelengths (355, 532 and 1 064 nm) simultaneously over Barbados [C]// EPJ Web of Conferences. [S.l.]: EDP Sciences, 2016: 18009.
- [82] VESELOVSKII I, DUBOVIIK O, KOLGOTIN A, et al. Application of randomly oriented spheroids for retrieval of dust particle parameters from multiwavelength lidar measurements [J]. *J Geophys Res*, 2010, 115: D21203.
- [83] JAGODNICKA A K, STACEWICZ T, KARASINSKI G, et al. Particle size distribution retrieval from multiwavelength lidar signals for droplet aerosol [J]. *Appl Opt*, 2009, 48: B8-B16.
- [84] DI H, 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.
- [85] DI H, ZHAO J, ZHAO X, et al. Parameterization of aerosol number concentration distributions from aircraft measurements in the lower troposphere over Northern China [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2018, 218: 46-53.
- [86] PÉREZ-RAMÍREZ D, WHITEMAN D N, VESELOVSKII I, et al. Effects of systematic and random errors on the retrieval of particle microphysical properties from multiwavelength lidar measurements using inversion with regularization [J]. *Atmos Meas Tech*, 2013, 6: 3039-3054.
- [87] 饶志敏,何廷尧,华灯鑫,等.多波段激光雷达颗粒物质量浓度探测方法[J].*光谱学与光谱分析*,2018,38(4): 1025.
- [88] GERDING M, RITTER C, MULLER M, et al. Tropospheric water vapour soundings by lidar at high Arctic latitudes [J]. *Atmospheric Research*, 2004, 71 (4): 289-302.
- [89] WANG Y, GAO F, ZHU C X, et al. Observations of atmospheric water vapor, aerosol, and cloud with a Raman lidar [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53 (11): 114105.
- [90] WANG W, GONG W, MAO F Y, et al. Long-term measurement for low-tropospheric water vapor and aerosol by Raman lidar in Wuhan [J]. *Atmosphere*, 2015, 6 (4): 521-533.
- [91] 李亚娟,宋沙磊,李发泉,等.基于纯转动Raman激光雷达的中低空大气温度高精度探测[J].*地球物理学报*,2015,58(7):2294-2305.
- [92] 刘玉丽,谢晨波,尚震,等.基于纯转动拉曼谱线激光雷达的大气温度反演分析[J].*光谱学与光谱分析*,2016, 36(6):1978-1986.
- [93] 朱金山,刘智深,郭金家.高光谱分辨率激光雷达(HSRL)大气温度测量模拟[J].*中国海洋大学学报*, 2005,35(5):863-867.
- [94] 吴永华,李陶,周军,等.Raman激光雷达探测对流层中上部大气温度分布[J].*大气科学*, 2002, 26 (5): 702-708.
- [95] 卜令兵,郭劲秋,田力,等.用于大气温度廓线测量的瑞利-拉曼激光雷达[J].*强激光与粒子束*,2010,22(7): 1449-1452.
- [96] 汪少林,苏襄,赵培涛,等.基于三级Fabry-Perot标准具的纯转动拉曼测温激光雷达[J].*物理学报*,2008,57 (6):3941-3947.
- [97] 李陶,戚福第,岳古明,等.大气中水汽混合比的Raman激光雷达探测[J].*大气科学*,2000,24(6):843-854.
- [98] 尚震,谢晨波,钟志庆,等.用于测量对流层水汽的拉曼激光雷达[J].*红外与激光工程*,2016,45(12):184-189.
- [99] 李博,华灯鑫,周艳,等.拉曼激光雷达测温的综合多级质量控制技术[J].*光学学报*,2017,37(4):325-337.
- [100] ARSHINOV Y F, BOBROVNIKOV S M, ZUEV V E, et al. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(19): 2984-2990.
- [101] VAUGHAN G, WAREING D P, PEPLER S J, et al. Atmospheric temperature measurements made by rotational Raman scattering [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(15): 2758-2764.
- [102] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Appl Opt*, 1984, 23: 652-653.
- [103] FERNALD F G, HERMAN B M, REAGAN J A. Determination of aerosol height distributions by lidar [J]. *J Appl Meteorol*, 1972, 11: 482-489.
- [104] 陈斐楠,黄禅,洪津,等.大气气溶胶多角度偏振探测仪在轨辐射精度与真实性验证研究[J].*上海航天*,2019, 36(增刊2):126-136.