

星载环境探测激光雷达及其关键技术

刘东^{1*}, 陈斯婕¹, 刘群^{1,2}, 柯举¹, 王南朝¹, 孙颖珊¹, 王帅博¹, 陈亚佟¹, 李蔚泽¹, 陶雨婷¹, 刘崇¹, 吴兰¹,
周雨迪^{1,2}¹浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;²浙江大学宁波科创中心, 浙江 宁波 315100

摘要 星载环境探测激光雷达能够获取昼夜环境垂直剖面信息, 已成为各国发展的重要遥感技术。经过近 30 年的发展, 该技术获取了大量全球地表信息和大气海洋环境信息, 为人类合理利用地球资源、应对全球生态环境和气候问题做出了巨大贡献。概述了星载环境探测激光雷达的发展历史, 重点阐述了星载激光雷达模拟器、星地真实性检验和数据处理与应用等关键技术, 探讨了星载环境探测激光雷达技术的未来发展方向。通过介绍星载环境探测激光雷达及其关键技术的背景知识, 帮助科研人员理解星载环境探测激光雷达如何为地球系统探测提供关键数据, 从而更好地保障数据精度及将数据应用于地球科学研究。

关键词 测量; 星载激光雷达; 大气科学; 海洋科学; 测绘; 环境; 气候

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1701001

Spaceborne Environmental Detection Lidar and Its Key Techniques

Liu Dong^{1*}, Chen Sijie¹, Liu Qun^{1,2}, Ke Ju¹, Wang Nanchao¹, Sun Yingshan¹,
Wang Shuaibo¹, Chen Yatong¹, Li Weize¹, Tao Yuting¹, Liu Chong¹, Wu Lan¹, Zhou Yudi^{1,2}¹College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;²Ningbo Innovation Center, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, China

Abstract Spaceborne environmental detection lidar, acquiring vertical profiles of environmental information at both day and night, has become an important remote sensing technology for several countries. After nearly 30 years of development, this technology has obtained a large amount of global surface information and atmospheric oceanic environmental information, which has made a great contribution to the rational utilization of earth resources and dealing with global ecological environment and climate problems. In this paper, the development history of spaceborne environmental detection lidar is summarized. The key technologies including the space-borne lidar simulator, satellite-ground validation, and data processing and application are emphasized. The future development directions of spaceborne environmental detection lidar are discussed. The background knowledge of spaceborne environmental detection lidar and its key technologies are introduced to help researchers understand how spaceborne environmental detection lidar provides key data for earth system detection, so that the data accuracy can be better guaranteed and lidar data can be more applied into earth science studies.

Key words measurement; spaceborne lidar; atmospheric science; marine science; surveying and mapping; environment; climate

1 引言

地球是一个多圈层及宇宙天体系统共同相互作用

下的综合系统, 岩石圈、大气圈、水圈、生物圈与月球、太阳等之间有着复杂而紧密的联系^[1-5]。例如: 海洋浮游植物和陆地植物通过光合作用获取太阳辐射的能

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-07-29; 录用日期: 2022-08-01

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2202001, 2016YFC0200700)、浙江省自然科学基金杰出青年项目(LR19D050001)、浙江大学宁波校区人才引进启动基金(20201203Z0175, 20201203Z0177)、杭州市生态环境科学研究院项目(703204C20201117)、浙江大学科研项目(XY2021050)、现代光学仪器国家重点实验室创新项目

通信作者: liudongopt@zju.edu.cn

量,为生物圈提供初级生产力^[6-7];地球自转效应、太阳辐射对地面的加热和区域的不均匀等效效应产生了地球的大气环流、局地风场等,成为地球上重要的能量流动形式^[8];大气圈内的气溶胶和云粒子通过对太阳光的吸收和散射作用,影响地球系统的辐射收支和循环模式^[9-10]。通过这些紧密的联系,化石燃料燃烧和人类毁林释放的 CO₂ 超过一半被陆地和海洋吸收^[11-12],地球内部变化驱动的火山爆发和森林火灾产生的尘埃在大气中对太阳辐射产生遮蔽,其沉降到海面也为海洋浮游植物的生长提供了养分^[4],这些地球内部、太阳辐射、人类活动等的驱动力对地球系统产生了深刻影响。理解地球系统内部的相互作用机制、预测地球系统未来的发展趋势,将为人类合理利用地球资源以及应对全球生态环境和气候问题提供重要支撑。

观测技术的进步促进了人们对地球系统的理解。特别是 20 世纪下半叶以来,由于不受飞行和地面条件的限制,可实现大尺度、长时序全球观测视野的卫星被动光学遥感发展迅猛^[13-14]。然而,被动遥感存在一定的原理性限制,如无法进行三维空间测量、受太阳光源的限制无法对夜间和高纬度地区进行较好的探测,以及同一观测积分像素内存在各种成分的相互干扰等^[15-17]。激光雷达能够获取激光出射路径上物质的垂直剖面信息,且采用主动的激光光源在夜间及两极地区均可实现较好的探测,有效补充了地球环境监测能力^[15,18-19]。近 30 年来,通过对地面高程、植被分布、冰层分布等地理信息^[20-21]和气溶胶、云、温度、风场、CO₂ 含量等大气环境参数^[22-23]及浮游植物等海水环境特性^[24-25]的观测,星载激光雷达在碳循环^[24-25]、极地冰层变化^[20]、云与气溶胶相互作用^[9]、云对全球变暖的影响^[10]、海洋动物的昼夜垂直迁徙^[1]等领域发挥了巨大作用。

目前,激光雷达已经成为了各国发展的重要星载遥感技术。本文旨在提供星载环境探测激光雷达及其关键技术的背景知识,帮助科研人员理解星载环境探测激光雷达如何为地球系统探测提供关键数据,从而更好地保障数据质量并将其用于科学研究。全文概述了星载环境探测激光雷达的发展历史,重点阐述了星载激光雷达模拟器、星地真实性检验和数据处理与应用等关键技术,最后探讨了星载环境探测激光雷达技术的未来发展方向。

2 星载激光雷达现状

1994 年 9 月 9 日,搭载着激光雷达空间技术实验激光器(LITE)的发现号航天飞机进入地球轨道,标志着第一台星载对地观测大气激光雷达成功实现轨道运行。这项原理验证任务为期 10 d,展示了该技术以高垂直分辨率探测大气对流层和通过光学薄云层获取地球表面数据的能力,为未来使用地球轨道激光雷达研究地球大气、海洋和地表奠定了基础。紧随其后,在 1996 年和 1997 年,航天飞机激光测高仪(SLA)在两次计划(SLA-01 和 SLA-02)中实现对地观测,其中 SLA-

01 提供了地球海洋表面、地表景观和云顶的数据,SLA-02 提供了地球表面地形、植被冠层和云顶的数据^[26]。随后的冰、云和陆地高程卫星(ICESat)也主要用于测高,除了基本冰面的高度计测量外,还测量了沙尘暴、云高、树高和森林火灾烟雾。这些前期实验性星载激光雷达(尤其是 LITE 和 ICESat)的发射,为气溶胶激光雷达和红外探路者观测卫星(CALIPSO)第一次真正实现长期在轨对地观测提供了基础。CALIPSO 目前已经在轨观测超过 15 a,为后续星载激光雷达积累了宝贵经验,如大气动力学测风激光雷达任务(ADM-Aeolus)、ICESat 的新一代激光雷达(ICESat-2)、气溶胶和二氧化碳探测激光雷达(ACDL)等。

本节将根据星载环境探测激光雷达的发展历程,将其分为高程探测激光雷达和大气探测激光雷达两部分,概述现役、退役的业务化星载激光雷达载荷,也包括部分研制中的载荷(表 1)。

2.1 ICESat/GLAS 和 ICESat-2/ATLAS

早期的星载激光雷达多以测距为主。美国宇航局(NASA)研制的 ICESat 卫星搭载的地球科学激光测高系统(GLAS)具有 532 nm 和 1064 nm 激光雷达通道,于 2003 年 1 月 12 日发射至 94° 倾斜角、600 km 高度的轨道上。GLAS 主要实现了冰盖质量变化的量化,并评估地球大气和气候变化如何影响极地冰量和全球海平面高度。

作为 ICESat 的后续任务,ICESat-2 同样由 NASA 研制,并于 2018 年 9 月 15 日成功发射到约 500 km 高度轨道上,重复周期为 91 d,其上搭载了先进地形激光测高系统(ATLAS),其主要目的是继续执行 ICESat 未完成的观测任务,对极地冰盖、海冰高程变化及森林冠层覆盖进行长期科学研究^[27],并在 GLAS 和数据处理算法基础上进行了多项改进和优化。ATLAS 是一个连续运行的直接探测脉冲激光高度计,工作波长为 532 nm^[28],它首次将单光子探测技术引入地球高程探测,极大地提高地形探测的数据获取率。由于采用光子计数体制,激光器的单脉冲能量仅为 40~120 μJ,在同样的系统功耗下,载荷设计了 6 个波束,激光重复频率高达 10 kHz,足印间距仅为 0.7 m,故可实现星下 6 个条带的连续探测。ATLAS 的 6 个波束中,3 个波束能量较强,其他 3 个波束较弱,两者能量比约为 3:1,这样的设计可适应不同反射率目标的测量,减少由单次回波光光子数过多导致的地表反射率反演失真问题。ATLAS 剖面数据已被广泛应用于水深测定和树高冠层结构信息的相关研究中^[29],同时在火山与地质灾害监测及冰山的监测和追踪等方向展现出巨大的潜力^[20]。

2.2 CALIPSO/CALIOP

CALIPSO 卫星搭载的正交偏振云-气溶胶激光雷达(CALIOP)被誉为迄今为止最成功的星载大气探测激光雷达^[22-23]。CALIPSO 是 A-Train 卫星序列之一,由 NASA 和法国国家太空研究中心(CNES)联合研

表 1 现役、退役、在研业务化星载高程及大气探测激光雷达汇总

Table 1 Summary of in-orbit, retired, and under-research spaceborne laser altimeters and atmospheric lidars

Device	Mission	Sponsor	Year	Repeat cycle	Lidar payload	Wavelength / nm	Type	Target
Space-borne laser altimeters	ICESat	NASA	2003	91	GLAS	532/1064	Laser altimeter	Ice, elevation, clouds, aerosols
	ICESat-2	NASA	2018	91	ATLAS	532	Photon-counting laser altimeter	Ice, topography, vegetation
Space-borne atmospheric lidars	CALIPSO	NASA / CNES	2006	16	CALIOP	532/1064	Mie-scattering	Clouds, aerosols
	CATS	NASA	2015	3	CATS	532/1064	Mie-scattering / HSRL	Clouds, aerosols
	Aeolus	ESA	2018	7	ALADIN	355	Doppler	Wind field, clouds, aerosols
	DQ-1	CNSA	2022	16	ACDL	532/1064 / 1572	HSRL/IPDA	CO ₂ , clouds, aerosols
	EarthCARE	ESA / JAXA	2023	25	ATLID	355	HSRL	Clouds, aerosols
	ASCENDS	NASA	2025	16	IPDA lidar	1572	IPDA	CO ₂
	MERLIN	CNES / DLR	2027	28	IPDA lidar	1645	IPDA	CH ₄

制,于2006年4月28日发射到在距地705 km的太阳同步轨道上,重访周期为16 d。

CALIOP是一台双波长偏振米散射激光雷达,可以精确测量云层、气溶胶层的高度,并获得其光学厚度、种类及微物理特性^[22,30]。这些数据与其他卫星和地基仪器的观测结果帮助科学家构建大气模型、研究有关气候过程的重要问题,进而更好地了解全球气候变化。CALIOP激光器通过倍频技术能够同时输出532 nm和1064 nm的脉冲激光,其垂直分辨率在8.2 km以下为30 m,在8.2~20 km之间为60 m,初始水平分辨率为333 m。CALIOP的接收系统由一台1 m口径的接收望远镜和三个信号检测通道组成:一个1064 nm信号检测通道和两个正交偏振的532 nm信号检测通道^[31]。采用高动态范围及偏振探测技术能够有效提升云-气溶胶的分辨能力和对非球形粒子的相态分析能力^[32-33]。同时,CALIOP还建立了详尽、完备的数据处理和反演流程。目前为止,CALIOP已经连续观测16 a,作为最成功的星载大气探测激光雷达,为之后各国发展新的星载激光雷达技术提供了宝贵经验。

2.3 CATS

云气溶胶输送系统(CATS)的激光雷达同样由NASA研制,于2015年1月发射并搭载在国际空间站上,轨道高度为405 km。CATS在设计上包括了高光谱分辨率激光雷达(HSRL)和弹性后向散射激光雷达,然而发射后,HSRL并未获得有效数据,其弹性后向散射激光雷达载荷由两个高重复率(4~5 kHz)、两个波长(1064 nm、532 nm)的低能量(1~2 mJ)Nd:YVO₄激光器、一个具有110 μrad视场的60 cm铍望远

镜接收系统、光子计数探测器和记录光子时间的数据系统组成^[34-35]。CATS是太空中第一个高重复率的光子计数激光雷达,能够在1 d中的不同时间观测相同的位置,能够近乎实时(不到6 h)地提供云和气溶胶数据产品,使科学家能够从太空研究云和气溶胶效应的昼夜变化,实现更准确的气溶胶建模和预测。相较于传统的星载遥感探测载荷等大型任务,CATS项目建设速度快、预算小,且搭载在空间站上。CATS于2017年10月30日完成了远超其设计寿命(6个月)的工作任务,停止了运行。尽管在轨时间较短,但CATS实现了许多突破,为未来主动遥感技术提供了许多技术上的指导,为后续前往空间站的低成本任务以及旨在测量云层和气溶胶的先进激光技术铺平了道路。

2.4 ADM-Aeolus/ALADIN

被称为“风神”的ADM-Aeolus卫星搭载了第一台监测全球三维风场的大气激光多普勒仪(ALADIN),其由欧洲航天局(ESA)研制,于2018年8月22日发射入轨,轨道高度为320 km,覆盖观测整个地球仅需7 d。ALADIN是一台多普勒测风激光雷达,该仪器由激光发射器组件、一个光机系统和一个接收器组件组成,工作波长在紫外谱段(355 nm)。通过测量输出脉冲与后向散射信号间的延迟与多普勒频移量等,ALADIN就能计算出风的方向、速度和移动距离^[36-37]。Aeolus卫星能够对0~30 km高度的全球大气风廓线进行测量,并以1 m/s的风速精度对地表(高度为0~2 km)以及以2 m/s的风速精度对自由对流层(0~16 km高度)内的大气风场进行测量,获得每50 km足迹内的平均风速,每小时测量120个风廓线。作为世界首颗全球测风卫星,Aeolus近乎实时的观测提高数

值天气和气候预报的准确性,并加深与气候多变性相关的热带动力学及变化过程的理解。

2.5 DQ-1/ACDL

2022年4月16日,我国将大气环境监测卫星(DQ-1)发射到距地705 km的太阳同步轨道上,星上搭载了气溶胶-云探测激光雷达(ACDL)、高精度偏振扫描仪、多角度偏振成像仪、紫外高光谱大气成分探测仪及宽幅成像光谱仪等5台有效载荷^[38]。其中,ACDL载荷由HSRL和积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达两部分组成,共有5个接收器通道,分别是532 nm混合平行通道、532 nm混合垂直通道、532 nm分子通道、1064 nm混合散射信号通道和1572 nm IPDA通道,且每个通道都具有备用的接收器。相较于已有的星载激光雷达,ACDL有两个主要突破:首次采用IPDA技术高精度测量全球范围的大气CO₂柱浓度分布和色谱柱平均干燥空气摩尔分数;首次采用基于碘分子吸收池的HSRL技术测量全球气溶胶垂直剖面分布,获取气溶胶散射系数、消光系数、光学厚度、边界层高度等垂直分布信息^[39]。

2.6 EarthCARE/ATLID

除了以上现役及退役激光雷达外,ESA与日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)正在联合进行地球云-气溶胶和辐射探测卫星(EarthCARE)的研制,并预计将于2023年发射^[40]。该计划的主要目的是观测和表征云层与气溶胶,测量从地球表面和大气发射的红外辐射及反射的太阳辐射。该卫星的计划载荷包括大气激光雷达(ATLID)、云廓线微波雷达、多光谱成像仪和宽带辐射计。ATLID也是一台HSRL,在紫外光谱域(355 nm)中工作,以51 Hz的重复频率发射短时间的激光脉冲。对于0~20 km的高度,ATLID的垂直分辨率为100 m;对于20~40 km的高度,分辨率为500 m。EarthCARE有望改进人们对于云、气溶胶和降水过程及不同大气过程响应的理解,并利用探测结果对大气模型进行评估和改进。

2.7 ASCENDS/IPDA 激光雷达

为进一步开展CO₂的全球观测,NASA正在研制昼夜、季节CO₂排放主动感知卫星(ASCENDS)。该卫星预计于2025年发射,设计轨道高度为450 km^[41]。ASCENDS上将搭载IPDA激光雷达,能够在复杂条件下探测大气中的CO₂柱浓度,并同时监测温度和气压的变化,包括夜间和高纬度地区,薄云情况下也能获取数据,填补以往观测资料的空缺^[42]。在此基础上,ASCENDS能够探明CO₂源汇分布的时间尺度变化,包括短期(昼夜)、中期(季度以及年度)以及长期(气候周期),有望为地球系统处理模型提供数据,提升CO₂源汇分布探测或者模拟的能力,明确CO₂在大气中的传输过程。

2.8 MERLIN/IPDA 激光雷达

同时在研的还有星载甲烷遥感激激光雷达(MERLIN)卫星,由德国航天局(DLR)和CNES联合研制,DLR负责研制IPDA激光雷达载荷,CNES提供

卫星平台,该卫星预计于2024年发射到500 km的太阳同步轨道^[43]。IPDA激光雷达能够发射两束波长相近的激光,其中一束位于甲烷线吸收线中心(λ_{on} , 1645.552 nm),另一束位于吸收谷(λ_{off} , 1645.846 nm),作为参考波长。根据信号的比率来计算甲烷柱浓度,用于改善对于全球甲烷源汇分布以及其与地球气候相互作用机理的认知,并区分自然源与人为源,提升对于气候变化的预测能力,为《京都议定书》等国际协议提供甲烷排放数据。

相比传统的地基激光雷达,星载激光雷达的设计以及运行更加复杂:卫星载荷需要增加全球定位系统(GPS)以确定卫星实时位置和姿态,确定激光路径;卫星载荷硬件难以实现二次维修,一般需装载备用激光器和探测器;受到星载观测平台信噪比的限制,以及受地表、大气环境不断变化等因素的影响,处理卫星数据的反演算法比地基系统更加复杂,需要入轨前和在轨期间的充分验证,以确保其数据准确有效。因此,为了实现有效探测,星载激光雷达通常会对以下关键技术进行攻关:开发针对不同目标的星载激光雷达模拟器,在发射前充分评估激光雷达性能;开发星地真实性检验技术,在轨期间对数据进行充分的检验;开发数据处理与应用技术,打通技术-数据-应用全链路。

3 星载环境探测激光雷达模拟器

研制星载环境探测激光雷达是非常复杂的系统工程,所需的时间和人力成本巨大,为了充分论证卫星的科学任务和性能指标、评估其可行性,需要开发激光雷达回波信号的正演模型及数据反演算法,构建端到端的激光雷达模拟器(图1)。正演模型通过对激光雷达硬件系统、大气-海气界面-海洋等环境要素及不同机制激光辐射传输的模拟,获取仿真的激光雷达信号。数据反演则通过解析回波信号的特性,从回波信号中得到环境要素参数。CALIOP为了预测系统的探测效果、为探测数据提供验证平台,建立了信号的正演仿真模型^[44],构建了端到端的CALIOP模拟器^[45],并在卫星发射后提出了一系列的数据处理和反演方法,得到了丰富的云及气溶胶数据产品^[46]。在温室气体探测激光雷达领域,未来预计发射的MERLIN IPDA激光雷达和昼夜、ASCENDS IPDA激光雷达也都构建了相应的正演模型,并根据反演结果评估了激光雷达的CH₄和CO₂的探测能力^[47-48]。尽管目前还没有专门用于探测海洋的星载激光雷达,但前期已有关于星载海洋激光雷达的模拟研究,这些研究探讨了星载海洋激光雷达的可行性^[49-50]。由此可见,模拟器对于发展星载环境探测激光雷达至关重要。

3.1 大气云及气溶胶激光雷达

星载激光雷达探测大气云及气溶胶发展较为成熟、应用十分广泛。在CALIOP发射前,美国NASA兰利研究中心通过构建模拟场景对CALIOP L1及L2数据处理算法性能进行了验证^[44]。近期,构建新一代的高精度星载HSRL模拟器受到广泛关注。DLR开

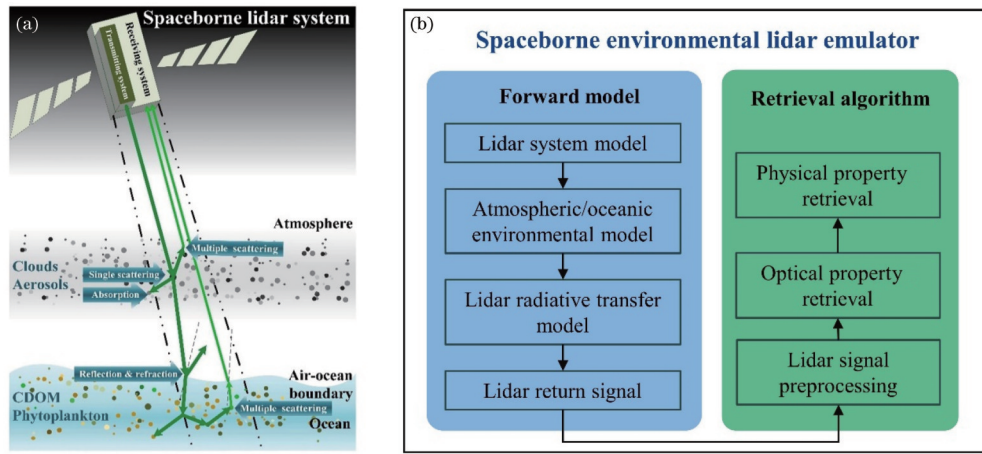


图 1 星载激光雷达。(a)基本探测原理示意图^[50];(b)模拟器框架
Fig. 1 Spaceborne environmental lidar. (a) Diagram of basic detection principle^[50]; (b) schematic of emulator

发了基于蒙特卡罗(MC)方法的星载HSRL正演模型和精确反演算法,并通过对卷云下方气溶胶层次的反演来验证算法性能^[51]。成都信息工程大学利用CALIOP消光系数产品及数值天气预报数据进行了532 nm波段的星载HSRL信号模拟及数据反演^[52]。针对我国自主研发的星载大气探测激光雷达ACDL-HSRL,武汉大学提出了一种简化的光学参数反演方案,减少了传统方法的方程数量和中间变量,避免了后向散射系数反演结果的虚假极值^[53];浙江大学开展了一系列的模拟研究,评估了HSRL的探测精度,开发了相关的数据反演算法^[38];南京信息工程大学通过对机载样机实验数据进行反演分析,实现了对HSRL样机

的校准及性能评估^[54]。

以ACDL HSRL的模拟器构建为例,其信号正演可分为理论正演信号计算和加噪信号获取两部分。首先可以使用CALIOP L2的APro和CPro数据分别还原模拟场景中云和气溶胶层次的散射,并将大气温湿压廓线信息输入大气模型,获得模拟场景中大气分子的散射。将大气信息与HSRL的硬件参数相结合,根据激光雷达方程计算出三个信号通道的理想衰减后向散射信号。随后,在理想衰减后向散射信号的基础上,添加热噪声、暗电流噪声、太阳背景噪声等以模拟出噪声信号^[44]。经信号正演模拟所得到的平行、垂直、分子通道信号如图2(a)~(c)所示。

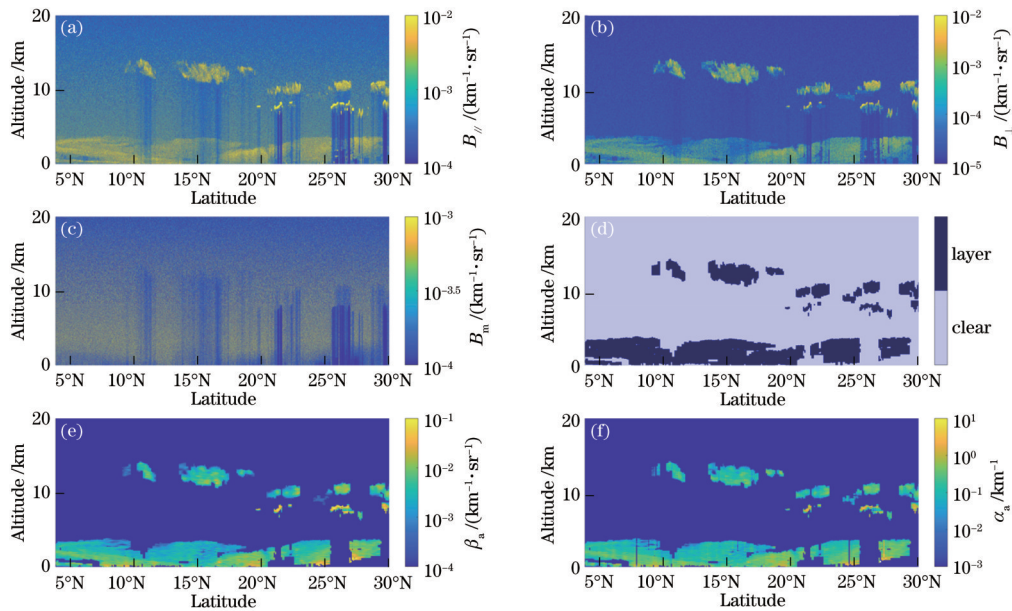


图 2 ACDL HSRL 信号仿真与反演。(a)平行通道的衰减后向散射系数 $B_{//}$;(b)垂直通道的衰减后向散射系数 B_{\perp} ;(c)分子通道的衰减后向散射系数 B_m ;(d)层次信息;(e)后向散射系数 β_a ;(f)消光系数 α_a

Fig. 2 Signal simulation and retrieval of ACDL HSRL. (a) Attenuated backscatter coefficient of parallel channel $B_{//}$; (b) attenuated backscatter coefficient of perpendicular channel B_{\perp} ; (c) attenuated backscatter coefficient of molecular channel B_m ; (d) layer information; (e) backscatter coefficient β_a ; (f) extinction coefficient α_a

反演模块主要包含以下两个步骤:层次识别步骤和消光反演步骤。层次识别步骤利用阈值法将云、气溶胶层次与清洁大气区域区分开来,以减小后续反演过程中的不确定性,如图 2(d)所示。消光反演步骤则基于 HSRL 反演算法,直接计算大气光学特性参数^[38],如图 2(e)、(f)所示。与 CALIOP 相比,HSRL 反演算法最显著的区别在于:其利用气溶胶散射谱与分子散射谱的差异将两者分离开来,能够在不假设激光雷达

比的前提下对大气中云、气溶胶粒子的参数进行精确反演,无需借助分类信息,因此可以省略反演前的层次分类步骤。此外,在反演完成后,还需要进行反演误差分析^[55],实现 ACDL HSRL 仪器性能验证及算法效果量化。误差分析则将 ACDL HSRL 模拟器输出的气溶胶反演结果同输入的 CALIOP 气溶胶反演结果进行对比,根据误差评估理论得出相应光学参数的误差分布情况,如图 3 所示。

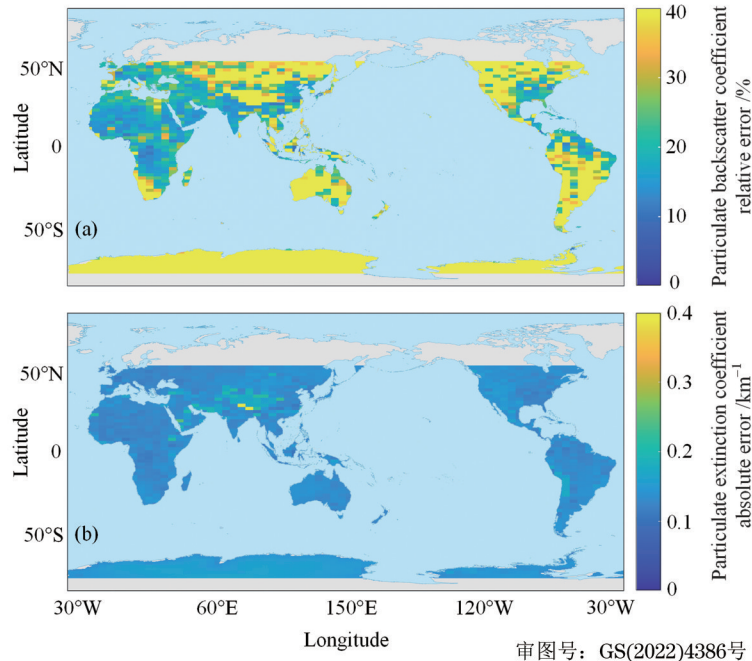


图 3 ACDL HSRL 在地表 1 km 处的理论测量误差。(a)后向散射系数相对误差;(b)消光系数绝对误差

Fig. 3 Theoretical measurement error for ACDL HSRL at 1 km. (a) Relative error of backscatter coefficient;(b) absolute error of extinction coefficient

3.2 大气温室气体激光雷达

IPDA 激光雷达是基于待测分子特征化吸收光谱来测量大气中特定分子浓度的一种主动探测仪器,其探测数据常用作大气温室气体 CO_2 、 CH_4 以及 N_2O 含量的反演,因有利于全球碳循环和气候变化研究而具有极大的科学意义和社会意义^[56]。DLR 基于星载 IPDA 激光雷达研究不同系统参数下 CO_2 、 CH_4 以及 N_2O 探测的系统误差与随机误差^[47],并基于 MERLIN 卫星系统参数构建 CH_4 IPDA 激光雷达正演模型以评估大气 CH_4 的探测性能^[57]。NASA 在 ASCENDS 任务中开展了 CO_2 IPDA 激光雷达正演模拟并结合反演模型得到卫星伪数据分析测量精度,仿真结果显示 CO_2 干空气体积混合比 (XCO_2) 测量精度优于 0.5% (10 s 均值)^[48]。中国在温室气体激光雷达的设计、研制中也进行了很多开拓性的工作。针对 ACDL IPDA 激光雷达载荷,武汉大学模拟分析了中国区域以及典型城市场景下 IPDA 激光雷达的系统误差与随机误差^[58-59],浙江大学开发了 IPDA 激光雷达模拟器,通过同化多源卫星以及大气模式数据构建近实时大气环境,并通过对模拟回波信号进行反演,最终得到大气中

CO_2 含量的伪数据结果^[56]。

以星载 CO_2 IPDA 激光雷达为例,其正演过程包括激光发射、大气传输、地表反射以及探测系统接收的全链路模拟仿真^[56],需要建立激光雷达硬件系统仪器模型以及探测器模型、大气辐射传输模型以及地表反射模型。仪器模型以及探测器模型主要由卫星平台以及激光雷达系统参数决定,需要考虑探测器暗电流噪声、热噪声以及太阳背景噪声等^[47];激光在大气中的传输过程可以通过大气辐射模型进行高光谱分辨率的辐射模拟,计算得到特定激光波长处大气透过率^[56];地表模型的构建根据下垫面的不同分为陆地地表以及海洋地表两大类,考虑到星载激光雷达常工作于天顶模式下,对于陆地地表反射率可以使用朗伯体进行表征,而对于海洋表面的反射率是基于菲涅耳反射定律进行模拟,同时考虑海洋白帽与飞沫导致的散射以及海水的吸收^[60]。

浙江大学结合大气环境监测卫星 ACDL-IPDA 激光雷达载荷硬件系统参数、卫星平台参数、逐线积分辐射传输模型 (LBLRTM) 进行激光发射^[48,57,61]、传输以及接收过程的模拟,结合 MODIS、CALIOP 数据以及

ECMWF 模式数据进行地表状态以及大气状态的构建,最终完成激光器、大气吸收、散射、地表反射以及探测器接收的全过程模拟,得到星载 IPDA 激光雷达在近似真实大气环境下的回波信号并反演得到测量结果伪数据的全球分布^[56]。图 4 结果为利用 LBLRTM 模拟得到的 CO₂ 与 H₂O 分子的双程光学厚度(OD),竖向实线与虚线分别表示激光器的 on-line(6361.226 cm⁻¹)与 off-line(6360.979 cm⁻¹)波数。

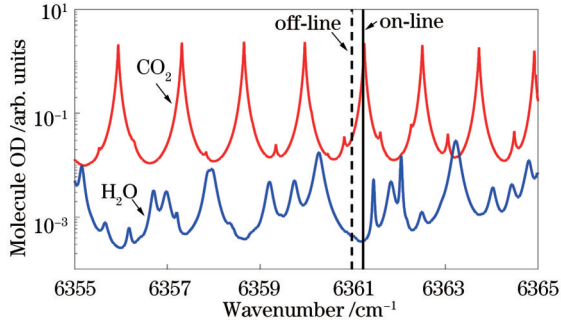


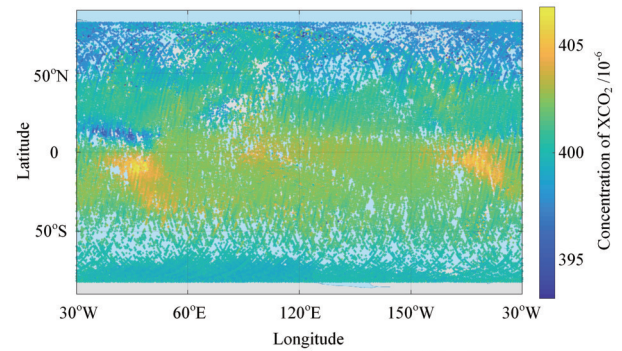
图 4 星载 IPDA 激光雷达正演模拟双波长处的双程光学厚度
Fig. 4 Two-way optical depths for two wavelengths simulated by spaceborne IPDA lidar forward model

星载 CO₂ IPDA 激光雷达反演的基本原理为差分光学吸收光谱技术(DOAS),如图 4 所示,其中 on-line 位于 CO₂ 的吸收峰附近,其光学厚度或者大气透过率对 CO₂ 含量的变化比较敏感,而 off-line 远离 CO₂ 的光谱吸收峰,是位于吸收较弱位置处的参考光。on-line 与 off-line 的波长相近,因此对于特定待测分子以外的大气分子以及散射介质的透过率基本相同。利用两个波长处激光雷达回波信号的差异就可以提取出大气中的 CO₂ 的含量。

星载 CO₂ IPDA 激光雷达反演的基本流程为:首先进行有效回波信号的提取,基于提取得到的激光监测信号与硬目标回波信号计算得到差分光学厚度,考虑到卫星平台以及地表之间的相对运动以及风场的影响,还需要进行多普勒频移校正,之后利用高分辨率分子吸收光谱数据库(如 HITRAN^[62]),大气辅助数据温湿压廓线,以及逐线积分辐射传输模型计算得到 IPDA 激光雷达权重函数,将两者相比可得 CO₂ 干空气体积混合比 XCO₂^[56]。此外,由激光雷达回波信号还可得 1572 nm 处的地表反射率以及地表散射高程信息。图 5 为模拟的星载 IPDA 激光雷达测量得到的 XCO₂ 伪数据的全球分布^[56]。值得注意的是,星载 IPDA 激光雷达的反演不仅可进行地表反射信号的反演,同时还可以进行云上反演,如 2018 年马里兰大学基于 NASA IPDA 原理样机机载实验结果开发了云上 CO₂ 反演算法,有效提升了星载 CO₂ 激光雷达数据利用率与反演质量^[63]。

3.3 测风激光雷达

星载测风激光雷达对于全球大气-海洋环境数值预报、海洋灾害监测、海气相互作用、大气动力学研究具有重要意义。1998 年,ESA 提出了 ADM-Aeolus 任



审图号: GS(2022)4386 号

图 5 星载 IPDA 激光雷达测量得到的 XCO₂ 伪数据全球分布
Fig. 5 Global distribution of XCO₂ pseudo data simulated by spaceborne IPDA lidar inversion model

务,并在此后的数年中详细论证了 ADM-Aeolus 的工作参数和研究意义,并于 2018 年联合 NASA 共同实现了 ADM-Aeolus 的发射^[64-66]。2017 年,日本国家信息通信技术研究所模拟了超低空卫星的星载测风激光雷达的工作性能并评估了系统的风速测量误差^[67]。2019 年,国防科技大学分析了分子散射对星载多普勒测风激光雷达米通道计算风速的影响^[68]。此外,浙江大学也基于美国标准大气模型和米散射理论分析了不同激光发射波长下大气中的分子和气溶胶颗粒的吸收和散射特性,结合鉴频器的工作特性论证了星载测风激光雷达的系统参数,并在此基础上进一步利用实测的大气光学参数分析了星载测风激光雷达的工作能力。

星载测风激光雷达的仿真模拟主要包括散射信号模拟和回波信号鉴频两部分。将信号视作发射激光与多普勒高斯谱的卷积,计算大气回波信号谱。由于散射类型的不同,气溶胶回波信号和大气分子回波信号的展宽有一定差异,气溶胶信号的频谱宽度可以约等于出射激光的谱宽,而分子信号的展宽则同时由大气分子热运动和出射激光谱宽决定。根据大气的光学特性分布和激光雷达探测原理计算探测器接收到的气溶胶和分子后向散射光子数,获取大气散射信号。结合双边缘鉴频器的透过率特性,计算鉴频器对气溶胶和大气分子后向散射信号的透过率响应函数、灵敏度特性和信噪比特性,利用系统的信噪比和灵敏度进一步推演双边缘系统在某一特定径向方向测量的风速误差。采用 CALIOP 测得的大气光学特性作为仿真模拟的输入,经散射信号模拟和回波信号鉴频获得的分子信号、气溶胶信号、信噪比分布和误差分布如图 6 (a)~(d)所示。

海面风场极大地影响着海浪、海流、温盐度等环境要素,是海洋上层运动的主要动力来源。针对海洋上空这一特殊环境,计算 6 种空气质量标准下的气溶胶光学性质,分析激光雷达的信号分布特征。6 种空气质量标准对应的 PM_{2.5} 的质量浓度(C)上限为:1 级为 35 μg/m³,2 级为 75 μg/m³,3 级为 115 μg/m³,4 级为 150 μg/m³,5 级为 250 μg/m³,6 级为 350 μg/m³。利用气溶胶浓度的垂直分布特性^[69]、气溶胶的粒径分布特

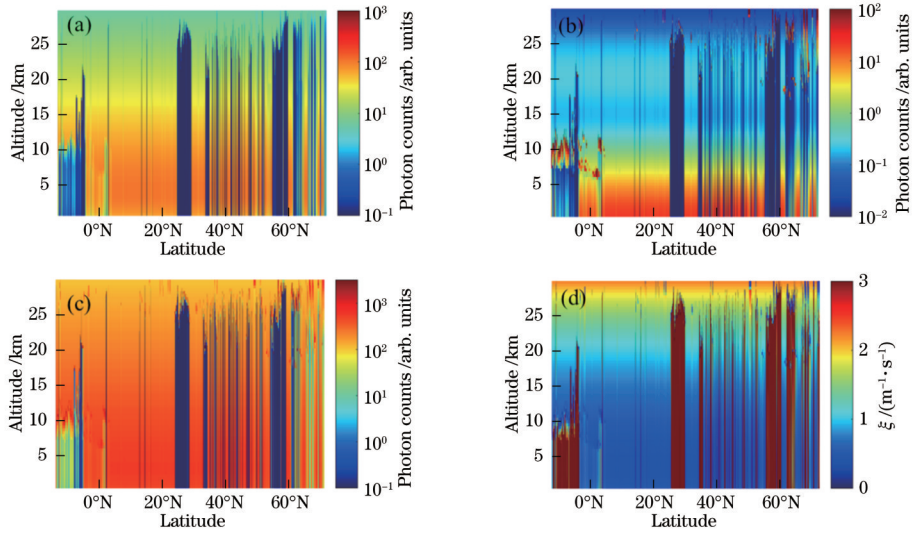


图 6 测风激光雷达仿真结果。(a)分子信号分布;(b)气溶胶信号分布;(c)信噪比分布;(d)探测误差 ξ 分布

Fig. 6 Wind lidar simulation results. (a) Molecular signal distribution; (b) aerosol signal distribution; (c) signal-to-noise ratio distribution; (d) detection error ξ distribution

性^[70]和Mie散射理论计算出不同天气质量、不同波长条件下气溶胶光学性质(散射系数、后向散射系数、消光系数)随高度的数值分布。采用星载测风激光雷达仿真模型得到大气的散射信号、系统信噪比分布和探测误差分布,如图7所示。

依据图7可以发现空气质量对于激光雷达的信噪

比与测量误差具有明显影响:当空气质量良好时,系统信噪比相对较高,激光雷达的探测误差在近地面处能够达到1 m/s;当空气质量恶劣时,系统信噪比相对较低,激光雷达的探测误差在近地面处则会在7 m/s左右,伴随着天气状况变差,在近地面处,激光雷达的探测误差将会逐渐增大。

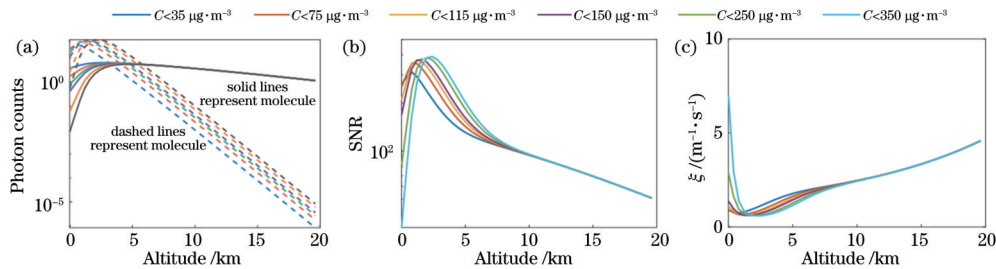


图 7 星载测风激光雷达仿真分析。(a)散射信号分布;(b)信噪比(SNR)分布;(c)探测误差分布

Fig. 7 Simulation analysis of spaceborne wind lidar. (a) Scattering signal distribution; (b) signal-to-noise ratio distribution; (c) detection error distribution

3.4 海洋激光雷达

星载海洋激光雷达辐射传输正演模型需要对激光雷达从发射到穿过大气、海面 and 海水介质直至返回到探测器这一全链路的探测过程进行深入细致的模拟。该模拟过程中,需要对大气-海面-海水进行高度真实的三维建模,需要仿真不同搭载平台、不同工作机制以及不同系统参数的激光雷达系统,并且需要构建高精度、高效率的辐射传输模拟算法。目前,在大气、海面和海水建模方面已有一些报道^[71],主要是根据大气和海水中不同物质成分的性质,利用米散射或非球形粒子模拟方法计算微物理特性或根据原位探测实验建立海水的生物光学模型^[72-74]。目前,模拟器构建算法主要有基于准单次散射小角度近似的解析法^[75-76]和基于蒙特卡洛(MC)随机光线追迹的数值法^[50, 77-78]等几种。NASA利用子午面MC方法实现了大气偏振激光雷达

信号的模拟^[79];自然资源部第二海洋研究所利用MC方法构建了海洋激光雷达模拟器,实现弹性散射激光雷达对海面的探测和对海水的仿真^[49]。

浙江大学利用半解析MC方法建立了星载激光雷达模拟器,模拟不同环境和硬件条件下的大气-海洋激光雷达回波信号^[50,77],实现了任意垂直分辨率的分层大气、分层水体、粗糙海面、不同散射相函数以及偏振光的模拟,同时利用GPU并行计算技术实现了高效率仿真。该模拟器可以实现大气-海面-海水的全链路仿真模式,并可以实现米散射激光雷达、偏振激光雷达和高光谱分辨率激光雷达等多种机制以及星载、机载、船载和地基等多探测平台的仿真^[50],如图8所示。

图9给出了偏振激光雷达正交偏振接收通道仿真信号与船载激光雷达实测信号对比结果^[71, 80-81],可以看出模拟器可以很好地复现实验结果。该模拟器为进

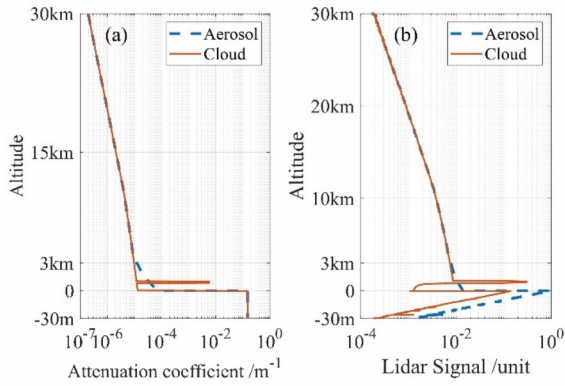


图 8 星载激光雷达回波信号仿真^[50]。(a)输入的消光系数；(b)仿真的激光雷达信号

Fig. 8 Spaceborne lidar return signal simulation^[50]. (a) Input attenuation coefficients; (b) simulated lidar signals

一步探究星载激光雷达回波信号形成机理、发展高精度的数据反演算法、为日后发射星载大气-海洋激光雷达提供了技术支撑。

根据激光雷达的探测原理,激光雷达接收来自大气和海水中分子和颗粒物的 180° 后向散射光,形成回波信号^[82]。但当探测介质的光学厚度较大、激光雷达接收脚斑很大的时候,激光与大气和海水中颗粒物发生多次前向或后向散射作用,使得偏离后向 180° 的散射光也有可能被探测器接收。此时,回波信号会受到多次散射的干扰,导致后向散射系数或有效的消光(衰减)系数与单次散射时不同^[83],这会给激光雷达信号的反演带来误差。由于大气水云和海水的的光学厚度较大,光子运动的自由程较短,而星载海洋激光雷达接收脚斑较大,因此水云和海水的多次散射效应是解析星载激光雷达回波信号、发展可靠反演算法时不可忽视的因素^[73]。

浙江大学在海洋激光雷达的多次散射反演方面做

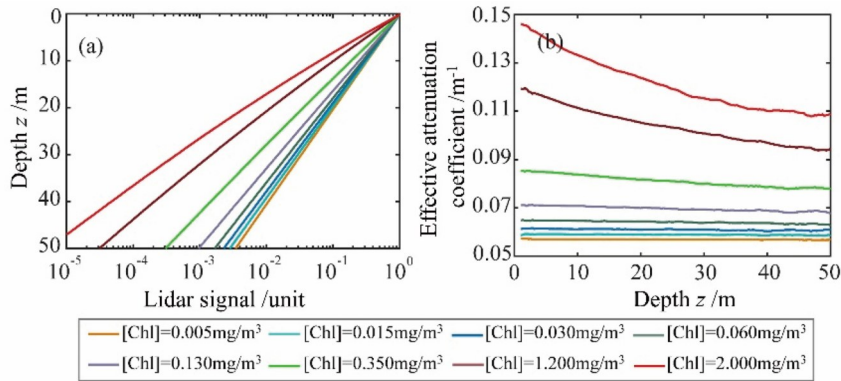


图 10 星载激光雷达在一类水体中的仿真分析^[86]。(a)激光雷达回波信号随深度的变化;(b)有效衰减系数随深度的变化

Fig. 10 Simulation analysis of spaceborne lidar in case I water^[86]. (a) Lidar return signals varying with depth; (b) effective attenuation coefficients varying with depth

从图 10 中可以看出:叶绿素质量浓度越大,海水的有效衰减系数也越大;并且在叶绿素质量浓度较大、单次散射率较高的海水中,有效衰减系数 k_{lidar} 会随深度

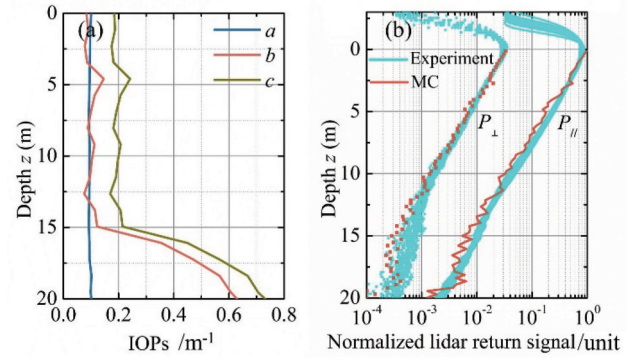


图 9 偏振激光雷达信号仿真^[50]。(a)输入水体光学特性；(b)实测与仿真信号对比(0 m 以上为大气信号,因船载激光雷达距离水面有一定距离)

Fig. 9 Polarized lidar signal simulation^[50]. (a) Input optical properties of water; (b) comparison of measured and simulated signals (data above 0 m is the atmospheric signal because the shipborne lidar has a certain distance from the water surface)

了诸多工作^[78,84-86]。为了量化多次散射的作用,在激光雷达方程中引入有效衰减系数 k_{lidar} ^[83,86]。受多次散射效应的影响,均匀海水中不同深度处的 k_{lidar} 值并不是一个常数,尤其是在刚入水的时候 k_{lidar} 表现出较明显的非均匀性^[87-89]。忽略 k_{lidar} 的非均匀性会给表层海水光学特性的反演带来较大的误差,进而影响浮游植物垂直分布和海洋初级生产力的评估精度;因此,为了更加有效地利用星载激光雷达的海洋探测能力,必须对多次散射造成的 k_{lidar} 非均匀性及其与海水光学特性之间的关系进行深入研究。通过上述辐射传输正演模型对叶绿素质量浓度为 $0.005\sim 2\text{ mg/m}^3$ 范围内的 8 种一类水体的激光雷达回波信号进行了仿真,其中水体的深度为 50 m,得到回波信号和有效衰减系数的结果如图 10 所示^[86]。

的增大发生改变。即使固有光学特性在垂直方向上保持不变, k_{lidar} 也不是一个恒定值。对回波信号的有效衰减系数与深度的关系进行线性、多项式以及指数形式

的拟合,发现 k_{lidar} 随深度的变化最符合以下指数形式: $k_{\text{lidar}}(z) = m \times \exp(-n \times z) + p$, 其中拟合系数 m 、 n 和 p 由吸收系数 a 和散射系数 b 拟合得到^[86]。研究表明,模拟预测的 k_{lidar} 与信号反演得到的 k_{lidar} 之间的误差小于 0.5%。相比于用生物-光学模型计算得到的漫射衰减系数 K_d 来近似 k_{lidar} , 该 k_{lidar} -IOPs 模型能够将反演精度提高 10 倍左右。利用该模型可以反演一类水体的固有光学性质和叶绿素质量浓度,提高星载激光雷达数据反演和全球浮游植物生物量和初级生产力评价的准确性。

此外,由于云层在海洋上空的分布非常广泛,用星载激光雷达探测海洋,大气是传输的必经之路,大气中云的多次散射效应比较强^[89-91]。因此,在有云存在的

情况下,星载海洋激光雷达的回波信号会受到云的多次散射效应信号拖尾的影响[图 11(a)],云层分布在 1~1.1 km 之间^[85]。这种现象会造成海水信号的失真,影响信号的反演精度,进而影响水体固有光学性质的探测精度。利用星载海洋激光雷达模拟器仿真不同光学性质的水云存在情况下的海水信号,分析云层多次散射信号拖尾海水信号探测的影响。云层的光学特性主要包括光学厚度、云层厚度、消光系数和云底高度等参数,其中云层厚度和消光系数的乘积为光学厚度。由于消光系数和云层厚度对海水信号的影响是一样的,所以可以将云层厚度和消光系数统一用光学厚度来表示^[85]。

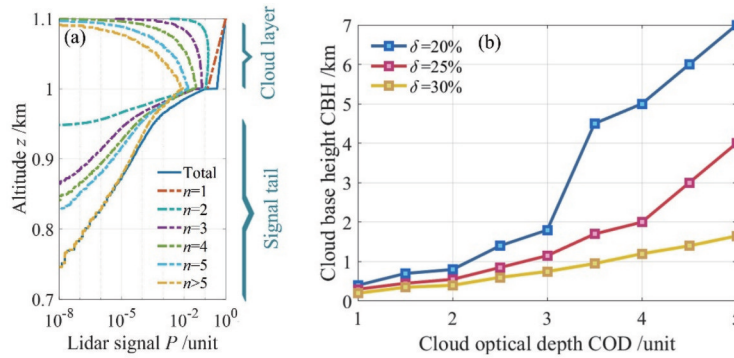


图 11 云的多次散射对海洋激光雷达探测的影响^[85]。(a)不同散射次数下的水云回波信号(n 代表散射次数);(b)有效衰减系数误差与云底高度和光学厚度之间的关系

Fig. 11 Influence of multiple scattering of cloud on oceanic lidar detection^[85]. (a) Water cloud echo signal with different scattering times (n is the scattering times); (b) relationship among effective attenuation coefficient error, cloud base height, and optical depth

为了保证在云存在的条件下海水信号有效衰减系数的探测误差控制在一定范围内,云层光学厚度和云底高度应满足一定的条件。图 11(b)给出了激光雷达回波信号的有效衰减系数误差 δ 与云底高度和光学厚度之间的关系^[85]。 δ 表示有无云存在时海水信号的有效衰减系数之间的相对误差。可以看出同一云底高度下光学厚度越大,相对误差越大。当有效衰减系数相对误差为 30% 时,随着光学厚度的增加,所需云底高度增加,且增加速度变化较缓,整体保持在一个较低的高度 (< 2 km)。当有效衰减系数的相对误差为 20%, 随着光学厚度的增加,云底高度变化较大。云底高度高于 1.8 km, 能使得有效衰减系数相对误差小于 20%。云层光学厚度大于 3 时,需要较高的云底高度 (> 2 km) 才满足相对误差小于 20%。

4 星载激光雷达真实性检验

星载激光雷达发射后,为了评估硬件系统的工作性能以及反演算法的鲁棒性,保证观测结果的准确度,借助原位测量仪器、星载被动遥感仪器,以及结构近似、精度更高的机载与地基激光雷达^[92]等对卫星载荷的数据处理算法以及探测误差进行评估,使其数据产品的信噪比、分辨率、不确定度等关键数值符合设计要求,从而实现对环境参数的精确测量。

搭载高程激光雷达载荷的 ICESat/ICESat-2 主要借助机载激光雷达、地基 GPS、MODIS 等仪器开展真实性检验工作^[93-96]; 搭载云-气溶胶激光雷达载荷的 CALIPSO 主要借助 MODIS、气溶胶自动观测网 (AERONET)、欧洲气溶胶研究激光雷达网 (EARLINET)、微脉冲激光雷达网 (MPLNET) 及机载激光雷达 HSRL-1 等仪器开展真实性检验工作^[93,97-105]; 搭载三维风场激光雷达载荷的 Aeolus 主要借助 ALADIN 机载样机 (A2D) 和 2 μm 多普勒测风激光雷达 (DWL) 以及地基风廓线微波雷达 (RWP) 网等开展真实性检验工作^[95,105]。

星载激光雷达移动速度较快 (> 7.5 km/s), 经过地面对比站点的时间较短,为了得到更多的有效对比数据源,需要部署更多的地基激光雷达站点,协同组建地基激光雷达网;星载激光雷达探测目标与接收系统的空间距离较远 (> 400 km), 受日间太阳背景噪声影响较大,在边界层以下探测信噪比较低,需要研制精度更高的机载或者地基激光雷达进行对比验证;星载-地基激光雷达的观测方向分辨率、垂直方向分辨率、下垫面类型不同,观测场景存在一定的空间间隔,为了减少上述因素对验证结果的干扰,需要建立观测数据的时空匹配算法。

4.1 地基雷达组网

地基雷达组网通过在星载激光雷达的星下轨道附近部署大量探测机制、硬件定标、数据反演算法接近的地基激光雷达,为星载激光雷达开展真实性检验提供大量的时空间匹配程度较好的对比数据源。例如:欧美国家部署的 EARLINET、MPLNET 等云-气溶胶激光雷达网,以及中国气象局部署的风廓线微波雷达网^[101-104,106]等。

EARLINET 建立于 2000 年,目前共有 31 个可提供后向散射和消光系数廓线的站点,大部分站点为多波长拉曼激光雷达^[107]。EARLINET 地基雷达网络拥有标准化的仪器校准与数据处理算法及公开的观测数据集,旨在建立一个可量化的、全面的、具有统计意义的欧洲大陆气溶胶时空分布数据库,以便研究气溶胶的种类、立体空间分布与传输等对气候环境和人类健康的影响;同时,EARLINET 可作为真实性检验的地面站点,为星载激光雷达数据评估积累了大量宝贵的经验。EARLINET 和 CALIOP 的数据真实性检验工作始于 2006 年 6 月^[104]。检验结果纠正了 CALIOP 早期的气溶胶退偏比计算方式,修正了云层的误识别,也更新了部分气溶胶激光雷达比的数值等^[106-107]。EARLINET 与 CALIOP 的数据校验工作集中于对 CALIOP Level 1 的衰减后向散射系数、Level 2 的气溶胶廓线产品(后向散射系数、消光系数、退偏比)和光学厚度的对比分析^[103,108-109]。EARLINET 大部分的站点还能提供 1064 nm 的后向散射系数和 532 nm 的退偏比,高性能站点能够提供 355 nm 和 532 nm 的后向散射系数以及消光系数廓线。这些站点的数据能够用于反演气溶胶的微物理特性,如粒径分布、复折射率及其衍生的物理量(如粒子质量、表面积浓度和单次散射反照率);以上数据特征可用于识别气溶胶类型,区分人为和自然产生的气溶胶来源,同时也可以用于对 CALIOP 的分类数据进行对比和校验。EARLINET 还有部分站点仅能提供单个波长的消光系数或者后向散射系数的廓线数据,这些站点一般分布在高性能站点 120~800 km 的范围内。虽然数据产品数量较少,但是其具有一定的区域性分布特征,能够为 CALIOP 研究陆地尺度的气溶胶测量数据提供检验的依据,同时也能够对气溶胶进行溯源分析(中欧东部的 EARLINET 站点能够对黑海区域产生的气溶胶进行观测)。

MPLNET 是一个由微脉冲激光雷达系统组成的地基联合观测网,20 世纪 90 年代早期,由 NASA 的戈达德太空行中心组建。目前 MPLNET 有 80 个站点,大多分布在 AERONET 站点附近,观测波长以 532 nm 为主,相较于仅分布在欧洲的 EARLINET, MPLNET 分布范围更广,其数据产品被广泛应用在全球云气溶胶垂直结构探测、气候变化空气质量研究和星载探测器真实性检验等领域^[110]。MPLNET 与 CALIOP 均为米散射激光雷达,探测机制相近,可以得到相似的观测结果,进而更准确地进行对比。将 CALIOP 在 2007—2011 年期间与 MPLNET 部分站点的结果进行对比,

验证了 CALIOP 对于云-气溶胶层次识别以及夜间消光系数反演的准确性^[106]。

中国风廓线微波雷达(RWP)网由中国气象局研制并部署在全国各个区域,共计 134 个站点,能够获取全天时的风速以及风向数据,RWP 的探测距离为 3~10 km,时间分辨率为 6 min,垂直分辨率为 120 m。2020 年 4—7 月,RWP 网对 Aeolus 风场数据进行了真实性检验,二者相关性较高(相关系数 $R > 0.81$),初步验证了 Aeolus 反演风场数据的准确性^[105]。

4.2 高精度激光雷达仪器

研制高精度探测机制的地基或机载激光雷达,能够准确评估星载激光雷达的探测偏差,优化其数据反演算法,提升星载激光雷达数据产品准确度。EARLINET 使用了高性能拉曼激光雷达 PollyXT,可获取 $3\beta + 2\alpha + 2\delta$ 的云-气溶胶光学参数,同时还包含近场 355 nm、387 nm、532 nm 和 607 nm 通道用于校正重叠因子,使得近场盲区小于 120 m。PollyXT 采用了多波长共路发射结构,减少分光光路对系统准确性的干扰;在接收系统中使用了 CCD 对接收系统的重叠因子稳定性进行评估;对分光镜的退偏效应进行了一定分析,使用了光纤耦合的卤素灯和氢灯作为光源,对分光镜的退偏效应进行了定量测量并校正;近场信号采用了光纤接收,并且使用了光纤扰偏器减小信号在光纤传播过程中随高度变化的影响。PollyXT 在全球各地均得到了高质量的大气云-气溶胶探测数据,为星载激光雷达提供了大量准确的地基对比数据源^[111]。

国内方面,浙江大学针对 DQ-1 上搭载 HSRL 的系统参数,研制了基于碘分子吸收池的 HSRL 工程样机,其系统内部结构如图 12 所示^[112-117]。该样机可实现无人值守、全天时观测,配备远程系统控制以及数据处理软件,便于移动及远距离运输,并已在中国杭州、舟山、北京、敦煌等地开展了长期观测实验,积累了大量云-气溶胶观测数据。该样机配置 532 nm 和 1064 nm 双波长 HSRL,且 532 nm HSRL 与 ACHSRL 采用的光谱鉴频器均为碘分子吸收池,吸收线均为 1111 线,相同的仪器参数配置能够最大程度地减少星载-地基数据真实性检验时系统误差引入的干扰^[118-120]。同时,该团队针对 HSRL 样机开发了相应的重叠因子定标、层次识别、云-气溶胶分类、消光系数反演、边界层高度识别等算法,确保样机反演数据的准确性^[112-114,121]。中国科学院安徽光学精密机械研究所于 2005 年成功研制了基于双 FP 标准具的 1064 nm 测风激光雷达,在 8 km 范围内,测量精度 $0.8-1.8 \text{ m s}^{-1}$ ^[122-124];2006 年,西安理工大学报道了基于 FP 干涉仪的鉴频器,研制了 355 nm 波段的 HSRL,可用于气溶胶以及卷云的垂直分布探测^[125];中国海洋大学于 2007 年研制了国内首台基于碘分子吸收池的车载激光测风雷达系统,在 10 km 以内,测量精度在 2.5 m s^{-1} ^[126-127],并于 2008 年研制了我国第一台基于碘分子吸收池的 HSRL 系统,可实现低层大气温度廓线测量^[128-129];2015 年,中国科学院安徽光机所报道了基于碘分子吸收池的 HSRL 系

统,通过观测能初步测算大气透过率以及云-气溶胶廓线数据^[130-131]。上述高精度激光雷达仪器将为我国星载激光雷达数据开展真实性检验提供准确的地基观测数据。

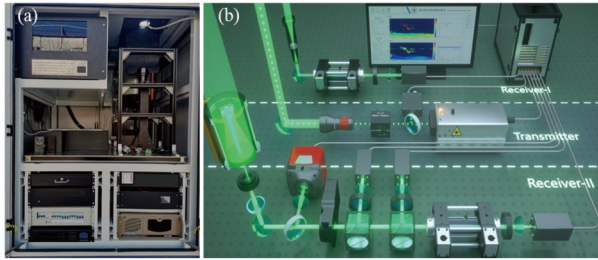
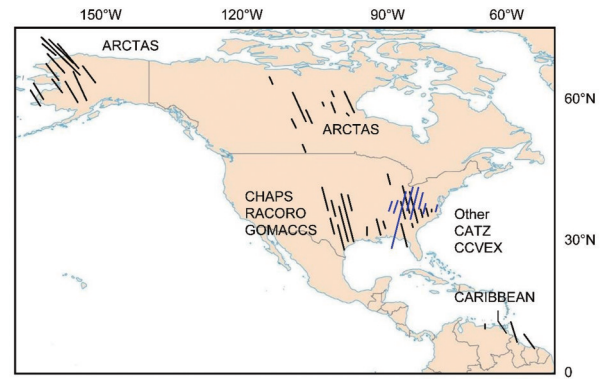


图 12 大气 HSRL 系统。(a)内部结构示意图;(b)光路图^[132]
Fig. 12 Atmospheric HSRL system. (a) Internal structure diagram; (b) optical path^[132]

机载激光雷达观测可以实现大范围测量,能够覆盖不同地形、城乡区域,沿星载激光雷达运行路径进行测量,数据产品不受地形因素的限制,时空匹配性较好。同时,相较于地基激光雷达,机载平台的观测盲区一般位于海拔 7.5~9 km 的范围,该区域几乎没有气溶胶的分布,因此,数据产品对比的可靠性和准确性得到进一步提升。

NASA 研制的机载高光谱分辨率激光雷达包括 HSRL-1 以及升级版的 HSRL-2。HSRL-1 为基于碘分子吸收池的 532 nm HSRL,同时可以测量 1064 nm 波段的后向散射系数。在 2006—2010 年,HSRL-1 与 CALIOP 开展了 86 次航行共计 115.7 h 的对比观测实验(观测轨迹如图 13 所示)。NASA 除了对 CALIOP 反演的数据可靠性和准确性进行合理的评估,还对 CALIOP 反演中假设的激光雷达比进行了校验和更新。随后 NASA 研制了探测性能更为强大的 HSRL-2。该系统为 355 nm/532 nm 双波长 HSRL,355 nm 波长 HSRL 使用法布里-珀罗干涉仪鉴频器,532 nm 波长 HSRL 采用碘分子吸收池,首次实现了利用 HSRL 获取 $3\beta+2\alpha+3\delta$ 的探测能力,其开展的 ORACLES 外场实验也是目前为数不多的能够公开获取的多波长 HSRL 高质量观测数据来源^[93,133]。

Aeolus 搭载的 ALADIN 测风激光雷达目前已开展两次机载校验实验,分别为 2018 年 11 月 5 日至 2018 年 12 月 5 日进行的 WindVal III 实验,以及 2019 年 5 月 6 日至 2019 年 6 月 6 日进行的机载激光雷达欧洲风神验证(AVATARE)实验。这两次实验共获得了 10 条卫星地面轨迹,覆盖了 7500 km 以上的 ALADIN 探测区域^[95]。WindVal III 和 AVATARE 校验实验采用的机载激光雷达包括 DWL 以及 A2D。DWL 的工作波长为 2022.54 nm,激光脉冲能量为 1~2 mJ,脉冲重复频率为 500 Hz,其水平和垂直分辨率约为 42 km 和 500 m。A2D 是在 DLR 开发于 2005 年投入使用的多普勒测风激光雷达,与 ALADIN 一样,该仪器由频率稳定的紫外激光发射器、卡塞格林望远镜和双通道鉴频器组成。激光器则采用三倍频的 Nd:YAG 激光器

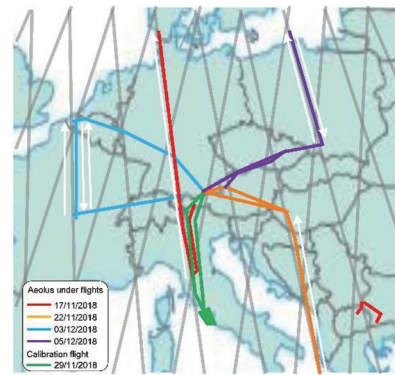


审图号: GS(2022)4386号

图 13 2006—2011 年间 NASA 团队开展的 CALIOP 与机载激光雷达外场校验实验轨迹分布图^[93]

Fig. 13 Track distribution of field calibration test of CALIOP and airborne laser radar from 2006 to 2011 carried out by NASA^[93]

系统,实现波长为 354.89 nm 的紫外激光脉冲输出,激光脉冲能量为 60 mJ,脉冲重复频率为 50 Hz,其水平和垂直分辨率分别约为 3.6 km 和 300~1200 m。



审图号: GS(2022)4386号

图 14 2018 年 ALADIN 与 A2D 开展真实性检验的轨迹图^[95]
Fig. 14 Flight tracks of validation of ALADIN and A2D in 2018^[95]

4.3 数据匹配方法

与星载激光雷达提供的沿轨廓线数据不同,单个地基激光雷达站点只能提供单点测量的廓线数据,且无法保证其地理位置与卫星地面轨道重合,因此需要综合考虑地基雷达站点分布与 CALIOP 当日轨道的位置关系。为了使用于对比验证的数据尽可能在时间和空间上匹配,检验工作一般选取 CALIOP 地面轨迹经过 EARLINET 站点附近 100 km 范围内的数据作为研究对象。EARLINET 站点的数据选取则以时间代替空间,从 CALIOP 进入比较范围开始,选取 30~150 min 的测量数据。这种对比方式能够最大程度地提供点对点的实时数据对比。而对于机载激光雷达,只需沿着卫星轨迹进行观测,时空匹配性较高^[103]。

星载-地基激光雷达观测方向不同,对于云-气溶胶激光雷达而言,其双程透过率的计算与积分路径相关,相反的积分方向会得到不同的结果,因此在开展对

比工作之前,都会将地基衰减后向散射系数改写成向下探测的方式。对于星载-机载的对比,二者通常存在激光指向性的差异,例如 ALADIN 与 A2D 的激光观测天底角不同,飞机和卫星的姿态角也不完全相同,在进行风速对比时需要采取几何校正的方式将机载风场测量廓线数据投影到 ALADIN 的观测平面上,进而得到可以用来对比的视线风速。同时,星载激光雷达与地基、机载的时空间分辨率不同,需要在对比分析之前进行分辨率的匹配,将高分辨率的数据平均到低分辨率的星载激光雷达数据之中^[95]。

完成时空间数据筛选和匹配之后,需要考虑如何

开展数据对比的工作。高程激光雷达主要针对地表高度、地表反照率等参数进行对比^[95-96,103];风场激光雷达主要针对风速廓线数据进行对比^[95,105];云-气溶胶激光雷达由于探测的光学参数种类较多,一般会针对衰减后向散射系数、云-气溶胶层次高度、后向散射系数、消光系数、退偏比等参数进行对比^[93, 97-104]。对比方式一般包括数据源的相关性系数、平均数值、偏差大小等因素的对比。表 2 列举了部分 CALIOP 与地基激光雷达开展真实性检验的案例,包括星载和地基激光雷达的间隔、时空间平均的时间和距离,以及对比的云-气溶胶数据源。

表 2 CALIOP 借助地基雷达开展真实性检验案例
Table 2 Validation cases for CALIOP based on ground-based lidar

City	Country	Location	Spacing /km	Length /km	Time /min	Datasets
Thessaloniki ^[134]	Greece	40.5°N, 22.9°E	<100	5-105	120	Levels 1&2
Potenza ^[94]	Italy	40.6°N, 15.7°E	66.5	5	30	Level 1
Seoul ^[135]	Korea	37.5°N, 6.95°E	5-10	6	15	Levels 1&2
Barcelona ^[101]	Spain	41.4°N, 2.12°E	77.9	100	30	Level 1
Granada ^[101]	Spain	37.2°N, 3.61°W	67	100	30	Level 1
Praia ^[136]	Cape Verde	14.6°N, 23.3°W	4-487	200-600	66-310	Levels 1&2
L'Aquila ^[102-103]	Italy	42.4°N, 13.3°E	53-107	15	50	Level 2
Hamburger ^[102-103]	Germany	53.6°N, 9.97°E	20	40	30	Level 2
Leipzig ^[102-103]	Germany	51.4°N, 12.4°E	305	40	144	Level 2
Maisach ^[102-103]	Germany	48.2°N, 11.3°E	55	40	30	Level 2
Athens ^[137]	Greece	37.9°N, 23.6°E	16-80	5-20	60	Level 1
New York ^[138]	USA	40.8°N, 73.9°W	30-100	50-100	30-100	Level 1
Mace Head ^[139]	Ireland	59.3°N, 9.9°W	29-60	5-100	5-60	Level 2
Harzgerode ^[139]	Germany	51.6°N, 11.1°E	43.65	5-100	60	Level 2

Notes: spacing is the distance from space-borne to ground-based lidar; length is integral length for space-borne lidar; time is integral time for ground-based lidar.

5 数据处理与应用

针对测高、测大气、测风等不同目标的星载环境探测激光雷达的成功在轨运行所提供的海冰变化、植被生物量,大气云、气溶胶、降水的光学及微物理特性,以及三维风场等数据,极大地推进了全球及区域气候研究和对气候过程的评估,对于改进气候模型、关注气候变化和未来发展起到了巨大的作用^[140-146]。其中,星载高程激光雷达为气候研究提供了两极海冰变化等大规模气候变化的关键指标^[147-149],其对多年较厚海冰和头年较薄海冰进行有效区分,尤其是对冰上积雪的辨别,有效降低了被动遥感对海冰损失计算中的不确定度^[149-150]。另外,其高程数据还在森林冠层和植被生物量反演中得到了应用^[151]。与此同时,大气探测激光雷达对云、气溶胶等颗粒物的测量,尤其是垂直剖面观测的结果,加深了人们对云、气溶胶光学及微物理特性的理解^[152-154]。星载激光雷达探测不仅对气候变化的驱动因子进行了定性和定量研究^[143,154],还关注降水、火灾、火山爆发等极端事件引起的区域气候问题^[142,155]。

近期,人们开始把 CALIOP 数据应用从大气拓展至海洋,展示了星载激光雷达探测海洋的巨大潜力,以及海洋光学遥感领域的下一个技术变革点^[1, 24-25]。

以下介绍星载激光雷达的具体应用,以及星载激光雷达与被动传感器、地基传感器、大气模型等的协同观测或数据融合,概述星载环境探测激光雷达在各研究领域取得的重要成果。

5.1 星载环境探测激光雷达应用

星载测高激光雷达在地表及冰面高程方面取得了重要应用。通过 ICESat 和 ICESat-2 获得的全球范围高度信息,在冰盖高程测量、海冰厚度测量、地表高程测量及其变化监测方面发挥了不可替代的作用,是研究极地海洋、分析如何应对气候变暖等的重要指标依据^[156-157]。对于冰盖监测,星载测高激光雷达成功量化南极洲和格陵兰岛的冰盖变化,并分析了冰层融化对于海平面变化的影响,建立了气候状况的关系模型^[20]。对于海冰监测,ICESat 能够提供高精度、高空间分辨率的海冰变化,为研究海冰表面降雪的累积、再分布以及海冰热力学和动力学提供重要支撑^[158]。除了极地

研究之外,依托星载高程数据的高精度,已有研究通过 ICESat-2 数据,利用机器学习方法建立外推模型,实现大尺度高精度高分辨率的森林高度制图^[159-160],并能够进一步推断森林地上生物量、冠层体积,为探索生物多样性和建立陆地气候模型提供数据支撑^[151-161],加深对当前生态环境的认识,这些研究与目前极受关注的碳源汇问题息息相关。此外,基于 ICESat-2 光子能够穿透水体获取水体深度的特征进行了水深测量的相关

研究,该研究能够填补内陆湖泊和全球近海岸水深测量的空白,提供湖泊水库水储量和近岸水深观测结果,有助于降低航道测量及近海岸海底地形勘测的成本^[162-163],提高对湖泊水库及近岸水深三维动态变化的认识。ICESat-2/ATLAS 光子对水体的穿透还让其能够观测到次表层浮游植物聚集现象^[164],图 15 利用探测到的漫射衰减系数 K_d 和颗粒后向散射系数 b_{bp} 展示了黄渤海浮游植物垂直分布在近岸和远岸的差异。

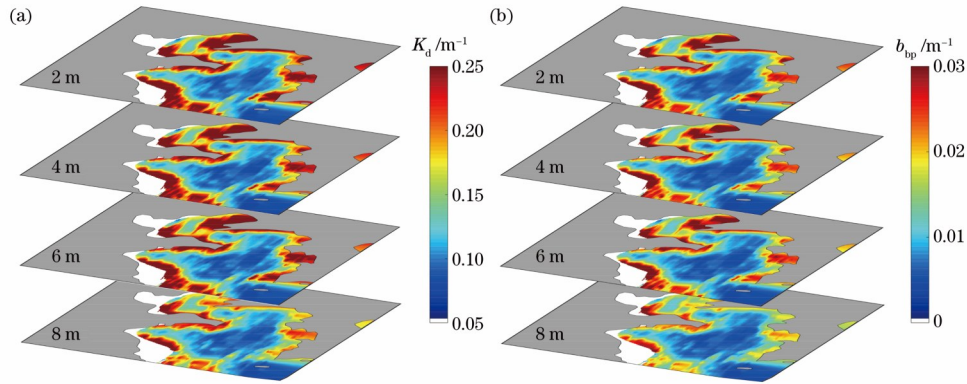
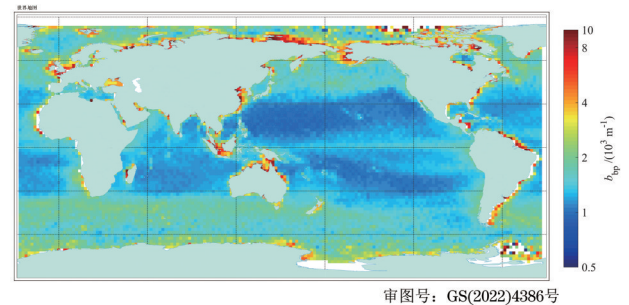


图 15 黄渤海浮游植物垂直分布。(a) K_d ; (b) b_{bp}

Fig. 15 Vertical distributions of phytoplankton of the Yellow Sea and Bohai Sea at different depths. (a) K_d ; (b) b_{bp}

在星载大气探测激光雷达中,以 CALIOP 为代表的大气云气溶胶探测激光雷达连续十多年为研究全球气候和环境变化提供了大量的第一手数据资料,全面完成了其科学目标,创造了巨大的经济和社会价值^[22]。CALIOP 为定性、定量地确定气溶胶三维空间信息、消光系数、水合状态以及大小颗粒区分等信息做出了尤为突出的贡献^[30]。这些数据帮助改进了各种模型对气溶胶的分布、频率、光学及微物理特性的表示,由此改进模型的评估结果,特别是对气溶胶直接和间接辐射效应的估算及对其不确定性的评估^[165-166]。在此基础上,大气探测激光雷达通过增加对云的了解,特别是对高空薄云和多层云的分布和特性的了解^[167-168],为短波和长波辐射通量的计算、全球气候模型的性能测试提供了强大的约束条件^[165,169]。除了预测长期气候问题,云气溶胶激光雷达对气象事件的观测也有重要价值。CALIOP 不仅在大规模气溶胶传输事件,例如沙尘传输、燃烧物传输、火山烟尘传输等方面进行全球和区域级别的追踪^[170],还通过与其姊妹星 CloudSat 的云雷达同步观测,为台风等大型气象事件提供完成的内部云廓线分布^[171-172]。CALIOP 不仅在主要大气目标方面实现了高精度、垂直分辨的测量,还在其他领域取得了重要应用,例如获取海洋动物昼夜迁徙特点^[1]、探测全球海水颗粒物分布结果[图 16]^[25,173-174]和获取地形数据及极地冰雪覆盖状态等^[175-176]。

相比云气溶胶激光雷达,星载测风激光雷达能够获取全球三维风场的观测资料,在天气预报、污染物预测、气候变化研究等多个方面具有重要的应用^[177]。风场资料被世界气象组织认为是数值天气预报和气象研究中最迫切需要的观测资料。星载激光雷达所获取的



审图号: GS(2022)4386号

图 16 CALIOP 探测全球海水颗粒物分布

Fig. 16 CALIOP detects global oceanic particulate distribution

全球三维风场数据能够有效弥补海洋及沙漠等区域的风场缺失,延长天气系统的预报时效^[65],提升天气预报精度^[178-182]。大气污染物的生成、发展与扩散直接受到大气风场的影响,因此,全球三维风场观测资料同样能够用于空气质量及污染物预报。星载多普勒测风激光雷达作为目前唯一能够获取全球垂直风廓线的载荷,获得的数据能有效改善污染物垂直分布的预测效果^[181-182]。此外,星载测风激光雷达还在气象、气候研究等诸多科学领域中发挥着重要作用,如观测热带气旋边界层垂直风与径向风不对称性的特征^[183-184],研究赤道平流层纬向风对全球平流层环流和对流层气候演变的影响^[184-185]等。此外,星载多普勒测风激光雷达在风力资源估计、航空飞行安全保障等方面也拥有较大的应用前景^[177-186]。

随着气候问题的不断加剧,多个国家同时开始温室气体及污染气体探测激光雷达的研制,最终,我国于 2022 年 4 月 16 日成功发射了全球首颗激光 CO_2 探测

卫星。星载 CO₂ 激光雷达高精度、高准确确定以及高时空分辨率的 CO₂ 数据可为国家温室气体清单校验和校正提供高质量数据, 服务于碳达峰与碳中和, 支撑全球碳盘点, 提升中国在国际气候谈判中的话语权。星载 CO₂ 激光雷达观测数据的首要应用目标为碳源汇的反演, 全球碳源汇估算的不确定性来源除了碳循环模式的认知缺陷外, 更重要的是高时空分辨率、高精度的碳观测数据的缺失^[187]。温室气体卫星遥感数据可实现碳源汇大范围、长时间的重复观测。美国科罗拉多州立大学基于 OCO-2 卫星温室气体观测资料反演全球主要 20 座发电厂的碳排放情况^[188], 结合统计验证结果表明两者之间的平均差异为 15.1%, 最小差异仅为 0.8%, 加拿大环境与气候变化部利用 OCO-2/3 温室气体观测数据反演全球 40 个大型城市的碳排放通量^[189]。中国武汉大学模拟了星载 IPDA 激光雷达对于典型中国城市的监测性能^[59], 结果显示 450 km 的卫星轨道高度可使得中国大多数城市的测量误差小于 0.3%。随着温室气体卫星载荷设计技术的发展, 其在温室气体排放监测以及碳源反演上的应用将会更加深入。星载 CO₂ 激光雷达观测数据可同化其他温室气体观测数据, 进一步结合气象资料、大气化学传输模式进行碳通量数据的反演, 进行全球碳循环以及碳-气候相互作用模型的研究。美国 NOAA 2007 构建全球第一个碳同化系统 Carbon Tracker, 同化全球机载与地基 CO₂ 观测数据, 优化全球生态系统碳通量^[190]。中国也在此基础上开发了自己的同化系统 Tan-Tracker^[191]。

5.2 星载激光雷达与多源数据融合应用

除了探测目标的高精度、垂直分辨测量之外, 不同机制星载激光雷达的组合可以实现对不同类型大气成分的同步探测。此外, 星载激光雷达与被动遥感载荷、地基遥感仪器的数据融合, 可以进行综合观测及精度传递, 尤其是与被动载荷进行长期同步观测, 被用于对后者的精度和算法进行验证^[192]。

我国 ACDL 卫星首次同时搭载 HSRL 和 IPDA 激光雷达, 可以将其对云、气溶胶的探测结果应用于排除二氧化碳反演中的干扰因素。无论是主动的星载 IPDA 激光雷达, 还是被动的 CO₂ 光谱仪, 其探测理论基础都是差分光学吸收光谱(DOSA)技术。该技术在大气分子吸收光谱与数据反演过程中, 大气中云、气溶胶的散射作用会使得结果出现测量误差。云、气溶胶对大气分子探测的影响主要体现在两个方面: 1) 云、气溶胶的吸收使得进入望远镜入瞳的能量减弱, 降低了有效信号的信噪比; 2) 云、气溶胶的多次散射作用改变了 CO₂ 探测光学路径长度, 从而导致出现系统误差, 光学路径的长度变化具体由云、气溶胶的光学特性[单次散射反照率(SSA)、不对称因子 g 等]、层次高度、太阳高度角和观测角、地表反照率等决定^[193]。因此, ACDL 搭载的两种激光雷达能够实现在反演二氧化碳的同时, 对云气溶胶吸收、散射效应进行校正。诸多研究表明^[193-194], 尽可能地消除散射作用的干扰, 可以提升温室气体、痕量气体分子浓度反演精度。

除此以外, 星载激光雷达和被动卫星的同步观测, 为开展主被动融合的数据应用建立了基础。被动传感器在垂直方向上缺乏探测能力, 进而导致其对多层次云、气溶胶等复杂场景的反演结果包含较大误差^[195], 而作为主动传感技术的激光雷达可以有效地弥补被动遥感的这一缺陷。此外, 激光雷达还能够弥补被动遥感因为夜晚没有太阳辐射而无法工作的缺点, 但其也存在着使用条件苛刻、覆盖范围较小等缺点。以 CALIOP 为例, CALIOP 的脚斑直径约为 70 m, 和被动传感器 MODIS 的超过 2000 km 的有效探测范围相比, CALIOP 的覆盖范围远远不及 MODIS。所以, 主被动融合的概念逐渐产生, 将主动和被动遥感结合起来, 能够有效地发挥两者的优势, 获得大范围的三维结构信息, 进行更大覆盖范围的探测。

目前, 主被动融合方法在多个领域中均有应用, 其中在大气领域的应用尤为突出^[196-198]。2011 年, 加拿大环境与气候变化部提出了一种基于主被动像点辐射相似程度将主动遥感数据和被动遥感信息进行匹配, 从而对主动轨道垂直剖面进行三维云结构拓展的方法, 称为光谱亮度匹配(SRM)法^[195]。基于该理论, 2016 年中国人民解放军理工大学开发了一种距离约束 SRM 算法, 扩展了主被动匹配的范围, 并且为了保证辐射相似性, 在 SRM 方法的基础上引入了更多的光学及物理特性参数用于约束匹配的条件^[199]。2019 年, 浙江大学将 SRM 算法进行优化, 并应用于气溶胶三维结构构建中^[197], 并于 2020 年提出了一种夜间红外 SRM (NSRM) 算法, 将 CSRSM 算法应用于夜间云三维结构构建^[200], 拓展了主被动遥感数据融合的适用范围。这类算法可以概括为“匹配-替代”算法, 拓展的廓线只能从主动遥感数据中寻找适配点, 无法对和主动遥感数据库差异过大的位置进行拓展。除了此类物理算法以外, 近年来出现了一些利用机器学习及神经网络例如前馈神经网络(FFNN)进行三维结果拓展的方法^[201-203], 这些方法表现出了较高的性能和计算效率。主被动融合的大气三维观测技术现被广泛应用于全球重点气候事件观测中, 图 17 为浙江大学基于 2021 年澳大利亚火灾期间的 CALIPSO 及 MODIS 数据获得的云气溶胶三维结构^[197]。

主被动融合在水深反演中也有较好的应用。ICESat/ICESat-2 等测高激光雷达根据激光发射和接收脉冲的时间差来测定卫星到表面的距离, 能够测量水质较好的浅水水深, 并与被动遥感水色数据进行结合, 获得区域内完整的水深数据。2007 年, NASA 结合 ICESat 水深数据和 Terra 卫星上搭载的多角度成像光谱仪遥感数据对玻利维亚的乌尤尼盐湖进行水深测量, 拓展了 ICESat 的廓线水深数据, 是一种典型的主被动结合卫星反演水深方法(SDB-AP)^[204]。2013 年, 荷兰代尔夫特理工大学对多个不同区域进行了水深反演并分析湖泊水量变化, 证明了主被动结合反演水深方法的广泛适用性^[205]。2014 年, CNES 利用 MODIS 数据, 应用网格和差值函数, 给出了时间分辨率为 8 d

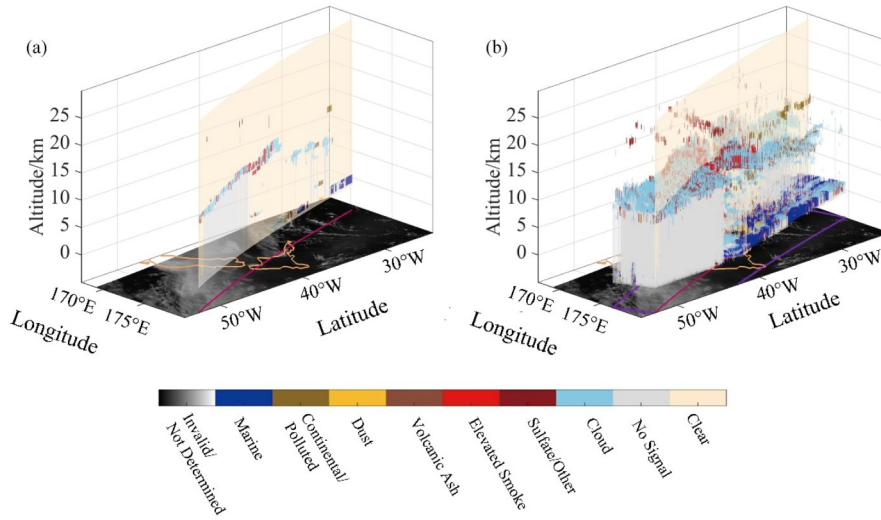


图 17 主被动融合云、气溶胶分布示意图^[197]。(a) CALIPSO 剖面及 MODIS 辐射数据; (b) 三维拓展结果

Fig. 17 Demonstration of aerosol and cloud distribution obtained by active and passive fusion^[197]. (a) CALIPSO profile and MODIS radiation data; (b) 3D extended results

的水深数据^[206]。ICESat-2 发射后,水深反演的精度和分辨率得到进一步提高。2019 年,美国德州农工大学利用 ATLAS 的机载原型多高度计波束实验激光雷达 (MABEL) 建立高程-面积关系,获得了米德湖动态范围的水深^[207]。2020 年,中国山东科技大学优化了 ICESat-2 的数据处理和纠错方法,获得更高精度的水深数据,并结合 Sentinel-2 多光谱数据训练了经验模型,使得基于经验模型的卫星多光谱图像不再受局部先验测量的限制^[163]。近年来,被动卫星分辨率的提高进一步提高主被动结合反演水深的分辨率^[208],此外,最新的机器学习和神经网络模型可运用于近岸水深反演^[209-210]。图 18 展示了根据 ICESat-2 光子高程数据,结合被动水色数据,在巴哈马地区以主被动融合手段获得的浅水 (<40 m) 水深,该地区具有大面积的浅水台地,被广泛用于浅水水深算法的研究中^[163,211-213]。

6 新型载荷技术

6.1 海洋 HSRL

目前已有许多星载激光雷达 (如 CALIOP、ICESAT-2 等) 应用于海洋探测的先例,相比于常见的探测手段来说,星载激光雷达一方面可以实现原位方法短时间难以完成的区域乃至全球尺度的大范围探测,另一方面它能突破被动水色遥感对于缺少光照以及云层覆盖的工作条件限制,具有广阔的应用前景。然而,当前研究基本局限于米散射激光雷达的技术体制,对于海洋颗粒物后向散射系数等核心参数的反演精度较为有限。海洋 HSRL 利用分子布里渊散射信号作为弹性散射信号的参考,能够在不假设激光雷达比的情况下提取海水的的光学特性^[214-215],有望进一步提高探测精度,提供水体浮游植物层的高精度垂直分布信息。事实上,HSRL 技术已经在海洋得到了应用^[216]。2016 年,NASA 首先报道了将 HSRL-1 改造为大气-海洋探测系统的研究成果。2017 年,浙江大学系统地评

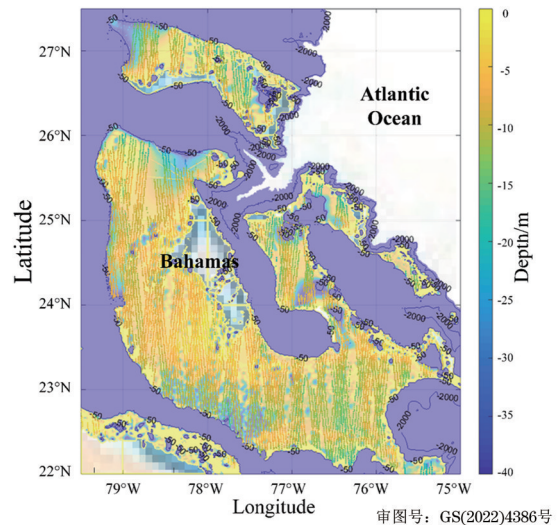


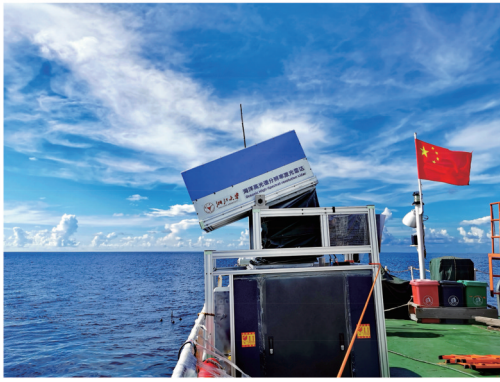
图 18 巴哈马地区 ICESat-2 主动轨迹与被动水色 (哨兵-2) 结合的浅水水深 (40 m 以内) 反演结果,采用相同遥感数据源的水深反演发表于^[163]

Fig. 18 Retrieval results of shallow water depth (within 40 m) in Bahamas from ICESat-2 photon data and Sentinel-2 ocean color. Water depth inversion using the same remote sensing data source was published in^[163]

估并展示了海洋 HSRL 的理论可行性^[78,84,217],同年,NASA 报道了海洋 HSRL 实验比对结果^[218]。2020 年,浙江大学报道了国内首套海洋 HSRL 系统 (图 19)^[219-220]。但总体来看,海洋 HSRL 技术仍然是一个相对较新的领域,在海洋环境高精度剖面遥感方面具有巨大潜力^[221]。

6.2 多波束激光雷达

多波束激光雷达使用多波束并行收发、单光子阵列探测,在全球测图、海洋测绘、极地测绘、陆海环境遥感等方面具有重要应用价值^[222]。多波束激光雷达系统的发射模块可以使用衍射光学单元或光纤阵列进行

图 19 船载海洋 HSRL 系统^[220]Fig. 19 Shipborne oceanic HSRL system^[220]

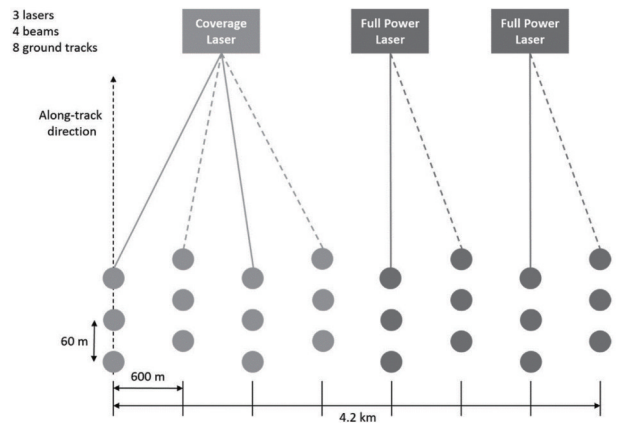
分光,实现多波束的同时发射;接收系统使用大口径望远镜接收后向散射光,采用单光子阵列探测器进行高精度飞行时间记录,提高探测效率和探测精度。多波束激光雷达配合偏振以及光致荧光检测等技术,还可获取陆地生物量、滩涂与潮间带、浅海地形,以及海洋次表层光学剖面等多种信息。

目前搭载多波束激光雷达载荷的在轨卫星主要有美国的 ICESat-2 与 GEDI(均于 2018 年发射)。ICESat-2 作为 ICESat-1 的继任者,搭载了六波束激光雷达载荷 ATLAS,探测采集采用了较为先进的光子计数技术,数据的采样率、覆盖能力及精度均有较大提升^[227]。GEDI 则搭载了全球首台用于高分辨率森林垂直结构与地形测量的多波束线性体制的激光测高仪(图 20),包含 3 个相同的 Nd:YAG 高重复频率、高能量短脉冲激光器,其中 1 个激光器被分成两个光束、另外 2 个激光器则不作调整,共产生 4 个光束,其通过光束偏转单元快速改变光束指向,产生多个激光脚斑,提高探测效率,主要用于森林冠层高度、垂直结构、地面高程等的精准测量^[223]。中国科学院上海技术物理研究所也曾研制了机载 8 光束阵列的光子技术激光雷达成像系统,并进行了机载飞行实验,测距精度达 6.3 cm,距离分辨率达 0.35 m^[224]。华东师范大学实现了 100 光束的光子计数激光成像,提出采用激光脉冲重复频率复用的方法,仅使用一个单光子探测器实现了 16 波束回波同时探测的激光成像的方法,极大地减少了单光子探测器的数量,为多波束激光雷达小型化提供了新的研究思路^[225]。

6.3 量子激光雷达

从原则上说,激光雷达的信噪比主要取决于激光功率及望远镜面积的大小,而探测采集方面的探测器因素常被忽视。举例来说,InGaAs 材料的雪崩光电二极管常用于 1.5 μm 波段的激光雷达探测,但其量子效率较低,器件性能仍有待优化。近年来,随着量子通信技术取得了卓越的进步和发展,作为接收端的单光子探测器在量子通信系统中起着至关重要的作用,其中上转换单光子技术极高的上转换内量子效率($>80\%$)为激光雷达探测器提供了一种新的选择。

量子激光雷达这一概念最早由美国罗切斯特大学

图 20 GEDI 的多波束地面探测光斑分布示意图^[223]Fig. 20 GEDI multi-beam ground detection spot distribution diagram^[223]

光学研究所于 2012 年研发提出,但这种雷达是利用偏振光子的量子特性来对目标进行探测和成像,能实现对隐形飞机的探测^[226]。而在大气探测领域,中国科学技术大学于 2015 年研制出了首台大气探测量子激光雷达,他们将近红外量子技术与激光雷达技术充分融合,实现了基于单光子频率上转换探测器的气溶胶激光雷达^[227]。次年,德国宇航局采用了相同的技术,首次实现了对二氧化碳探测的量子激光雷达^[228]。随后,中国科学技术大学团队研制了基于单光子频率上转换探测器的 1.5 μm 量子测风激光雷达(图 21),采用低能量、高重复频率的微脉冲激光器实现了边界层内的风场测量,有效地提高了测风激光雷达的理论探测性能上限^[229]。

7 结 论

激光雷达已经成为了各国重点发展的星载遥感技术,已经在地表环境信息和大气海洋环境信息探测等领域取得巨大突破。我们希望这篇综述对星载环境探测激光雷达的发展历史、关键技术、未来的科学展望提供有用的描述,帮助科研人员理解星载环境探测激光雷达如何为地球系统探测提供关键数据,从而更好地保障其数据精度及更多地将数据应用于地球科学研究。

每一种技术都有其优势和缺点,星载激光雷达可以探测剖面信息,但平面覆盖率较低,探测波长信息也相对较少。可以设想未来进一步发展全球环境探测星座,其核心在于将激光雷达与其他遥感技术结合在一起,如图 18 所展示的主被动融合实现云气溶胶的三维观测。这种匹配将最大限度地提高全球数据的时空覆盖率和信息维度,并允许跨仪器的数据比较和算法开发,提升反演的地球环境参数的可靠性与多样性。

应用需求是技术进步的重要推动力,星载激光雷达由于探测物质间的相互干扰小,具备强大的跨圈层剖面探测能力,应用领域涵盖了地表环境和大气海洋环境,并且目前仍在不断产生新的应用,图 16 和图 17 展示的并非海洋探测设计的 ATLAS 和 CALIOP 在海

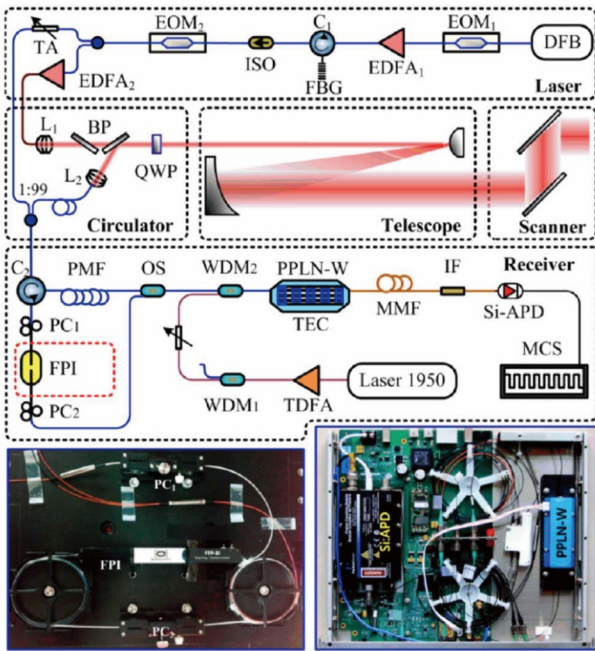


图 21 中国科学技术大学研发的量子测风激光雷达示意图^[229] (TA 为可调谐衰减器, WDM 为波分复用器, L 为准直镜, T DFA 为掺铥光纤放大器, TEC 为半导体制冷器, MCS 为多通道采集模块)

Fig. 21 Schematic diagram of quantum wind lidar developed by University of Science and Technology of China^[229] (TA: tunable attenuator; WDM: wavelength division multiplexer; L: collimation mirror; T DFA: thulium-doped fiber amplifier; TEC: thermo electric cooler; MCS: multi-channel sample module)

洋中的应用尝试。因此,需要持续开发星载激光雷达的跨圈层能力,实现海洋科学、大气科学、极地科学、地质学等诸多地球科学领域的交叉应用,为人类合理利用地球资源、应对全球生态环境和气候问题提供充分的科学支撑,也将为星载环境探测激光雷达技术的未来发展提供助力。

参 考 文 献

[1] Behrenfeld M J, Gaube P, Della Penna A, et al. Global satellite-observed daily vertical migrations of ocean animals[J]. Nature, 2019, 576(7786): 257-261.
 [2] Ho J C, Michalak A M, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s[J]. Nature, 2019, 574(7780): 667-670.
 [3] Osman M B, Das S B, Trusel L D, et al. Industrial-era decline in subarctic Atlantic productivity[J]. Nature, 2019, 569(7757): 551-555.
 [4] Tang W Y, Lloret J, Weis J, et al. Widespread phytoplankton blooms triggered by 2019–2020 Australian wildfires[J]. Nature, 2021, 597(7876): 370-375.
 [5] 刘文清. “双碳”目标下大气环境光学监测技术发展机遇[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0600001.
 Liu W Q. Opportunities and challenges for development

of atmospheric environmental optics Monitoring Technique Under "Double Carbon" Goal[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0600001.
 [6] Behrenfeld M J. Climate-mediated dance of the plankton [J]. Nature Climate Change, 2014, 4(10): 880-887.
 [7] Behrenfeld M J, O'Malley R T, Siegel D A, et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity [J]. Nature, 2006, 444(7120): 752-755.
 [8] 宋晶晶. 首个星载全球大气风场激光雷达成功发射[J]. 国际太空, 2018(9): 40-43.
 Song J J. World's first global wind spaceborne LiDAR launched successfully[J]. Space International, 2018(9): 40-43.
 [9] Toll V, Christensen M, Quaas J, et al. Weak average liquid-cloud-water response to anthropogenic aerosols[J]. Nature, 2019, 572(7767): 51-55.
 [10] Ramanathan V, Ramana M V, Roberts G, et al. Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption[J]. Nature, 2007, 448(7153): 575-578.
 [11] Friedlingstein P, Jones M W, O'sullivan M, et al. Global carbon budget 2021[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(4): 1917-2005.
 [12] le Quéré C, Andres R J, Boden T, et al. The global carbon budget 1959–2011[J]. Earth System Science Data, 2013, 5(1): 165-185.
 [13] Kim D, Ramanathan V. Solar radiation budget and radiative forcing due to aerosols and clouds[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(D2): D02203.
 [14] Wang Y, Wu C C. Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes: a review[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2004, 87(4): 257-278.
 [15] Hostetler C A, Behrenfeld M J, Hu Y X, et al. Spaceborne lidar in the study of marine systems[J]. Annual Review of Marine Science, 2018, 10: 121-147.
 [16] McClain C R. A decade of satellite ocean color observations[J]. Annual Review of Marine Science, 2009, 1: 19-42.
 [17] Groom S, Sathyendranath S, Ban Y, et al. Satellite Ocean colour: current status and future perspective[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 485.
 [18] Jamet C, Ibrahim A, Ahmad Z, et al. Going beyond standard ocean color observations: lidar and polarimetry [J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 251.
 [19] 龚威, 史硕, 陈博文, 等. 机载高光谱激光雷达成像技术发展与应用[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1200002.
 Gong W, Shi S, Chen B W, et al. Development and application of airborne hyperspectral LiDAR imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1200002.
 [20] Smith B, Fricker H A, Gardner A S, et al. Pervasive ice sheet mass loss reflects competing ocean and atmosphere processes[J]. Science, 2020, 368(6496): 1239-1242.
 [21] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land [J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34(3/4): 405-445.
 [22] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing

- algorithms[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310-2323.
- [23] Getzewich B J, Vaughan M A, Lee K P, et al. CALIPSO lidar calibration at 532 nm: version 4 daytime algorithm[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(11): 6309-6326.
- [24] Behrenfeld M J, Hu Y X, Hostetler C A, et al. Space-based lidar measurements of global ocean carbon stocks [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(16): 4355-4360.
- [25] Behrenfeld M J, Hu Y X, O'Malley R T, et al. Annual boom-bust cycles of polar phytoplankton biomass revealed by space-based lidar[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2): 118-122.
- [26] McCormick M P. Space lidar for Earth and planetary missions[EB/OL]. [2022-02-04]. [https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/NEW_4.12.05/McCormick%20-%20Space%20Lidar%20for%2022nd%20ILRC%20\(Color\).pdf](https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/NEW_4.12.05/McCormick%20-%20Space%20Lidar%20for%2022nd%20ILRC%20(Color).pdf).
- [27] Magruder L, Neumann T, Kurtz N. ICESat-2 early mission synopsis and observatory performance[J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(5): e2020EA001555.
- [28] Palm S P, Yang Y K, Herzfeld U, et al. ICESat-2 atmospheric channel description, data processing and first results[J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(8): e2020EA001470.
- [29] Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 735-751.
- [30] Kim M H, Omar A H, Tackett J L, et al. The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(11): 6107-6135.
- [31] Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2)[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [32] Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(19): L19803.
- [33] Vaughan M A, Young S A, Winker D M, et al. Fully automated analysis of space-based lidar data: an overview of the CALIPSO retrieval algorithms and data products [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5575: 16-30.
- [34] Storm M, Stevenson G, Hovis F, et al. Lidar and laser technology for NASA'S cloud-aerosol transport system (CATS) payload on the international space station (JEM-EF)[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 04002.
- [35] McGill M J, Yorks J E, Scott V S, et al. The Cloud-Aerosol Transport System (CATS): a technology demonstration on the International Space Station[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9612: 96120A.
- [36] Kanitz T, Ciapponi A, Mondello A, et al. ESA's lidar missions Aeolus and EarthCARE[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 237: 01006.
- [37] Paschou P, Proestakis E, Tsekeri A, et al. The ESA-EVE polarization lidar for assessing the Aeolus aerosol product performance[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 237: 07025.
- [38] Liu D, Zheng Z F, Chen W B, et al. Performance estimation of space-borne high-spectral-resolution lidar for cloud and aerosol optical properties at 532 nm[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): A481-A494.
- [39] Dong J F, Liu J Q, Zhu X L, et al. Error analysis of spaceborne high spectral resolution lidar[C]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10846: 108461N.
- [40] Illingworth A J, Barker H W, Beljaars A, et al. The EarthCARE satellite: the next step forward in global measurements of clouds, aerosols, precipitation, and radiation[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(8): 1311-1332.
- [41] Kawa S R, Abshire J B, Baker D F, et al. Active sensing of CO₂ emissions over nights, days, and seasons (ASCENDS): final report of the ASCENDS ad hoc science definition team[EB/OL]. (2018-11-01)[2022-01-02]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190000855>.
- [42] Abshire J, Browell E, Menzies R, et al. An overview of NASA's ASCENDS mission's lidar measurement requirements[M]. San Francisco: NASA, 2014.
- [43] Ehret G, Bousquet P, Pierangelo C, et al. MERLIN: a French-German space lidar mission dedicated to atmospheric methane[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1052.
- [44] Powell K A, Hunt W H, Winker D M. Simulations of CALIPSO lidar data[EB/OL]. [2022-02-04]. https://www-calipso.larc.nasa.gov/resources/pdfs/ILRC_2002/ILRC2002_Powell_Simulator.pdf.
- [45] Lieber M, Weimer C, Stephens M, et al. Development of a validated end-to-end model for space-based lidar systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6681: 66810F.
- [46] 刘东, 刘群, 白剑, 等. 星载激光雷达 CALIOP 数据处理算法概述 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(12): 1202001.
- Liu D, Liu Q, Bai J, et al. Data processing algorithms of the space-borne lidar CALIOP: a review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1202001.
- [47] Ehret G, Kiemle C, Wirth M, et al. Space-borne remote sensing of CO₂, CH₄, and N₂O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3): 593-608.
- [48] Kawa S R, Mao J, Abshire J B, et al. Simulation studies for a space-based CO₂ lidar mission[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2010, 62(5): 759-769.
- [49] Chen P, Jamet C, Mao Z H, et al. OLE: a novel oceanic lidar emulator[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(11): 9730-9744.
- [50] Liu Q, Cui X Y, Jamet C, et al. A semianalytic Monte Carlo simulator for spaceborne oceanic lidar: framework and preliminary results[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2820.
- [51] Filipitsch F, Buras R, Fuchs M. Model studies on the retrieval of aerosol properties beneath cirrus clouds for a spaceborne HSRL[C]. *AIP Conference Proceedings*,

- 2013, 1531(1): 452-455.
- [52] Yu X, Chen B L, Min M, et al. Simulating return signals of a spaceborne high-spectral resolution lidar channel at 532 nm[J]. *Optics Communications*, 2018, 417: 89-96.
- [53] 毛飞跃, 罗熙, 宋捷, 等. 中国星载气溶胶和云高光谱分辨率激光雷达的模拟和反演[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(4): 620-633.
- Mao F Y, Luo X, Song J, et al. Simulation and retrieval for spaceborne aerosol and cloud high spectral resolution lidar of China[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2022, 52(4): 620-633.
- [54] Wang Q, Bu L B, Tian L, et al. Validation of an airborne high spectral resolution lidar and its measurement for aerosol optical properties over Qinhuangdao, China[J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 24471-24488.
- [55] Cheng Z T, Liu D, Luo J, et al. Effects of spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar on the retrieval errors for atmospheric aerosol optical properties [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(20): 4386-4397.
- [56] Wang S B, Ke J, Chen S J, et al. Performance evaluation of spaceborne integrated path differential absorption lidar for carbon dioxide detection at 1572 nm [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2570.
- [57] Kiemle C, Kawa S R, Quatrevalet M, et al. Performance simulations for a spaceborne methane lidar mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(7): 4365-4379.
- [58] Han G, Ma X, Liang A L, et al. Performance evaluation for China's planned CO₂-IPDA[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 768.
- [59] Han G, Xu H, Gong W, et al. Feasibility study on measuring atmospheric CO₂ in urban areas using spaceborne CO₂-IPDA LIDAR[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 985.
- [60] Lancaster R S, Spinhirne J D, Palm S P. Laser pulse reflectance of the ocean surface from the GLAS satellite lidar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): L22S10.
- [61] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, 91(2): 233-244.
- [62] Gordon I E, Rothman L S, Hargreaves R J, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 277: 107949.
- [63] Mao J P, Ramanathan A, Abshire J B, et al. Measurement of atmospheric CO₂ column concentrations to cloud tops with a pulsed multi-wavelength airborne lidar[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(1): 127-140.
- [64] Straumelindner A G, Ingmann P, Endemann M. Status of the Doppler wind lidar profiling mission ADM-Aeolus [EB/OL]. [2022-07-07]. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=c2d1f9943c938ce2c52aeb33e7ed51d9>.
- [65] Stoffelen A, Marseille G J, Bouttier F, et al. ADM-Aeolus Doppler wind lidar observing system simulation experiment[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2006, 132(619): 1927-1947.
- [66] Durand Y, Culoma A J F, Meynard R, et al. Predevelopment of a direct detection Doppler wind lidar for ADM/AEOLUS mission[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5234: 354-363.
- [67] Baron P, Ishii S, Okamoto K, et al. Feasibility study for future spaceborne coherent Doppler wind lidar, part 2: measurement simulation algorithms and retrieval error characterization[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2017, 95(5): 319-342.
- [68] 刘延文, 孙学金, 张传亮, 等. 分子散射对星载测风激光雷达 Mie 通道的影响[J]. *激光与红外*, 2019, 49(2): 156-164.
- Liu Y W, Sun X J, Zhang C L, et al. Influence of molecular scattering on Mie channel of spaceborne wind lidar[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 156-164.
- [69] Chu D A, Tsai T C, Chen J P, et al. Interpreting aerosol lidar profiles to better estimate surface PM_{2.5} for columnar AOD measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79: 172-187.
- [70] Dubovik O, Holben B, Eck T F, et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3): 590-608.
- [71] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [72] Morel A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(C9): 10749-10768.
- [73] Uitz J, Claustre H, Morel A, et al. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: an assessment based on surface chlorophyll[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C8): C08005.
- [74] Ibrahim A, Gilerson A, Chowdhary J, et al. Retrieval of macro- and micro-physical properties of oceanic hydrosols from polarimetric observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 548-566.
- [75] Zhou Y D, Chen W B, Cui X Y, et al. Validation of the analytical model of oceanic lidar returns: comparisons with Monte Carlo simulations and experimental results [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16): 1870.
- [76] Hogan R J. Fast lidar and radar multiple-scattering models. Part I: small-angle scattering using the photon variance-covariance method[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65(12): 3621-3635.
- [77] Liu Q, Cui X Y, Chen W B, et al. A semianalytic Monte Carlo radiative transfer model for polarized oceanic lidar: experiment-based comparisons and multiple scattering effects analyses[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 237: 106638.

- [78] Zhou Y D, Chen W B, Liu D, et al. Multiple scattering effects on the return spectrum of oceanic high-spectral-resolution lidar[J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 30204-30216.
- [79] Hu Y X, Winker D, Yang P, et al. Identification of cloud phase from PICASSO-CENA lidar depolarization: a multiple scattering sensitivity study[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2001, 70(4/5/6): 569-579.
- [80] Liu D, Xu P T, Zhou Y D, et al. Lidar remote sensing of seawater optical properties: experiment and Monte Carlo simulation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(11): 9489-9498.
- [81] 周雨迪, 刘东, 徐沛拓, 等. 偏振激光雷达探测大气-水体光学参数廓线[J]. *遥感学报*, 2019, 23(1): 108-115.
- Zhou Y D, Liu D, Xu P T, et al. Detecting atmospheric-water optical property profiles with a polarized lidar[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(1): 108-115.
- [82] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 051405.
- [83] Gordon H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(16): 2996-3001.
- [84] Liu D, Zhou Y D, Chen W B, et al. Phase function effects on the retrieval of oceanic high-spectral-resolution lidar[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): A654-A668.
- [85] Cui X Y, Liu Q, Gu Q L, et al. Multiple scattering effect of water clouds on spaceborne oceanic lidar signals [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 288: 108253.
- [86] Liu Q, Liu D, Bai J, et al. Relationship between the effective attenuation coefficient of spaceborne lidar signal and the IOPs of seawater[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30278-30291.
- [87] Krekov G M, Krekova M M, Shamanaev V S. Laser sensing of a subsurface oceanic layer. I. Effect of the atmosphere and wind-driven sea waves[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(9): 1589-1595.
- [88] Walker R E, McLean J W. Lidar equations for turbid media with pulse stretching[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2384-2397.
- [89] Kopilevich Y I, Feygels V I, Surkov A I. Mathematical modeling of input signals for oceanographic lidar systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5155: 30-39.
- [90] 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.
- [91] Hu Y X. Depolarization ratio-effective lidar ratio relation: theoretical basis for space lidar cloud phase discrimination [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(11): 224-238.
- [92] Reitebuch O, Lemmerz C, Nagel E, et al. The airborne demonstrator for the direct-detection Doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part I: instrument design and comparison to satellite instrument[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(12): 2501-2515.
- [93] Rogers R R, Hostetler C A, Hair J W, et al. Assessment of the CALIPSO Lidar 532 nm attenuated backscatter calibration using the NASA LaRC airborne High Spectral Resolution Lidar[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(3): 1295-1311.
- [94] Mona L, Pappalardo G, Amodeo A, et al. One year of CNR-IMAA multi-wavelength Raman lidar measurements in coincidence with CALIPSO overpasses: level 1 products comparison[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(18): 7213-7228.
- [95] Witschas B, Lemmerz C, Geiß A, et al. First validation of Aeolus wind observations by airborne Doppler wind lidar measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(5): 2381-2396.
- [96] Kurtz N T, Markus T, Cavalieri D J, et al. Comparison of ICESat data with airborne laser altimeter measurements over Arctic Sea ice[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(7): 1913-1924.
- [97] Ma X, Bartlett K, Harmon K, et al. Comparison of AOD between CALIPSO and MODIS: significant differences over major dust and biomass burning regions [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(9): 2391-2401.
- [98] Redemann J, Vaughan M A, Zhang Q, et al. The comparison of MODIS-Aqua (C5) and CALIOP (V2 & V3) aerosol optical depth[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(6): 3025-3043.
- [99] Royer P, Raut J C, Ajello G, et al. Synergy between CALIOP and MODIS instruments for aerosol monitoring: application to the Po Valley[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3(4): 893-907.
- [100] 徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0710003.
- Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0710003.
- [101] Grigas T, Hervo M, Gimmetad G, et al. CALIOP near-real-time backscatter products compared to EARLINET data[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(21): 12179-12191.
- [102] Papagiannopoulos N, Mona L, Alados-Arboledas L, et al. CALIPSO climatological products: evaluation and suggestions from EARLINET[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(4): 2341-2357.
- [103] Pappalardo G, Wandinger U, Mona L, et al. EARLINET correlative measurements for CALIPSO: first intercomparison results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D00H19.
- [104] Escribano J, Di Tomaso E, Jorba O, et al. Assimilating spaceborne lidar dust extinction can improve dust forecasts[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, 22(1): 535-560.
- [105] Guo J P, Liu B M, Gong W, et al. Technical Note: first comparison of wind observations from ESA's satellite

- mission Aeolus and ground-based Radar wind profiler network of China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21(4): 2945-2958.
- [106] Campbell J R, Tackett J L, Reid J S, et al. Evaluating nighttime CALIOP 0.532 μm aerosol optical depth and extinction coefficient retrievals[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(9): 2143-2160.
- [107] Pappalardo G, Amodeo A, Apituley A, et al. EARLINET: towards an advanced sustainable European aerosol lidar network[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(8): 2389-2409.
- [108] Ansmann A, Bösenberg J, Chaikovskiy A, et al. Long-range transport of Saharan dust to northern Europe: the 11-16 October 2001 outbreak observed with EARLINET [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D24): 4783.
- [109] Wandinger U. Air mass modification over Europe: EARLINET aerosol observations from Wales to Belarus [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D24): D24205.
- [110] Berkoff T A, Welton E J, Campbell J R, et al. Observations of aerosols using the micro-pulse lidar NETwork (MPLNET) [C]//2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, September 20-24, 2004, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2004: 2208-2211.
- [111] Engelmann R, Kanitz T, Baars H, et al. The automated multiwavelength Raman polarization and water-vapor lidar Polly^{XT}: the neXT generation[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(4): 1767-1784.
- [112] Shen X, Wang N C, Veselovskii I, et al. Development of ZJU high-spectral-resolution lidar for aerosol and cloud: calibration of overlap function[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 257: 107338.
- [113] Xiao D, Wang N C, Shen X, et al. Development of ZJU high-spectral-resolution lidar for aerosol and cloud: extinction retrieval[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 3047.
- [114] Wang N C, Shen X, Xiao D, et al. Development of ZJU high-spectral-resolution lidar for aerosol and cloud: feature detection and classification[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 261: 107513.
- [115] 成中涛, 刘东, 刘崇, 等. 多纵模高光谱分辨率激光雷达研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0401001.
Cheng Z T, Liu D, Liu C, et al. Multi-longitudinal-mode high-spectral-resolution lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0401001.
- [116] 段绿林, 刘东, 张与鹏, 等. 基于混合智能算法的激光雷达数据拼接技术[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0601002.
Duan L L, Liu D, Zhang Y P, et al. Lidar data gluing technology based on hybrid intelligent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0601002.
- [117] 罗敬, 刘东, 徐沛拓, 等. 基于偏振分光棱镜的高精度偏振分光系统[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1210001.
Luo J, Liu D, Xu P T, et al. High-precision polarizing beam splitting system based on polarizing beam splitter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1210001.
- [118] Zhang Y P, Liu D, Shen X, et al. Design of iodine absorption cell for high-spectral-resolution lidar[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15913-15926.
- [119] Dong J F, Liu J Q, Bi D C, et al. Optimal iodine absorption line applied for spaceborne high spectral resolution lidar[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(19): 5413-5419.
- [120] Ke J, Sun Y, Dong C, et al. Development of China's first space-borne aerosol-cloud high-spectral-resolution lidar: retrieval algorithm and airborne demonstration[J]. *Photonix*, 2022, 3: 17.
- [121] Zhong T F, Wang N C, Shen X, et al. Determination of planetary boundary layer height with lidar signals using maximum limited height initialization and range restriction (MLHI-RR)[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(14): 2272.
- [122] Xia H Y, Sun D S, Yang Y H, et al. Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7120-7131.
- [123] 王邦新, 沈法华, 孙东松, 等. 直接探测多普勒激光雷达的光束扫描和风场测量[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 69-72.
Wang B X, Shen F H, Sun D S, et al. Beam scanning and wind field measurement of direct detection Doppler lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 69-72.
- [124] 王国成, 孙东松, 杜洪亮, 等. 基于法布里-珀罗标准具的 532 nm 多普勒测风激光雷达系统设计和分析[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(4): 949-953.
Wang G C, Sun D S, Du H L, et al. Design and analysis of 532 nm Doppler wind lidar with Fabry-Perot etalon[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 949-953.
- [125] 狄慧鸽, 华灯鑫. 云探测中的激光雷达技术研究进展[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600002.
Di H G, Hua D X. Research progress of lidar in cloud detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600002.
- [126] Liu Z S, Wang Z J, Wu S H, et al. Fine-measuring technique and application for sea surface wind by mobile Doppler wind lidar[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(6): 066002.
- [127] Wang Z J, Liu Z S, Liu L P, et al. Iodine-filter-based mobile Doppler lidar to make continuous and full-azimuth-scanned wind measurements: data acquisition and analysis system, data retrieval methods, and error analysis[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(36): 6960-6978.
- [128] 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.
Song X Q, Guo J J, Yan Z A, et al. High-spectral-resolution lidar detection of atmospheric aerosol optical properties[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(9): 1009-1015.
- [129] 郭金家, 闫召爱, 吴松华, 等. 高光谱分辨率激光雷达测量低层大气温度[J]. *光电子·激光*, 2008, 19(1):

- 66-69.
- Guo J J, Yan Z A, Wu S H, et al. Low level atmospheric temperature measurement with high spectral resolution lidar[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008, 19(1): 66-69.
- [130] Zhao M, Xie C B, Zhong Z Q, et al. Development of high spectral resolution lidar system for measuring aerosol and cloud[J]. *Journal of the Optical Society Korea*, 2015, 19(6): 695-699.
- [131] 赵明, 谢晨波, 钟志庆, 等. 高光谱分辨率激光雷达探测大气透过率[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(b05): 76-80.
- Zhao M, Xie C B, Zhong Z Q, et al. High spectral resolution lidar for measuring atmospheric transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(b05): 76-80.
- [132] Wang N, Zhang K, Shen X, et al. Dual-field-of-view high-spectral-resolution lidar: Simultaneous profiling of aerosol and water cloud to study aerosol-cloud interaction [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(10): e2110756119.
- [133] Thorsen T J, Fu Q, Newsom R K, et al. Automated retrieval of cloud and aerosol properties from the ARM Raman lidar. Part I: feature detection[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(11): 1977-1998.
- [134] Giannakaki E, Vraimaki E, Balis D. Validation of CALIPSO level-2 products using a ground based lidar in Thessaloniki, Greece[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8182: 818215.
- [135] Kim S W, Berthier S, Raut J C, et al. Validation of aerosol and cloud layer structures from the space-borne lidar CALIOP using a ground-based lidar in Seoul, Korea [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(13): 3705-3720.
- [136] Tesche M, Wandinger U, Ansmann A, et al. Ground-based validation of CALIPSO observations of dust and smoke in the Cape Verde region[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(7): 2889-2902.
- [137] Mamouri R E, Amiridis V, Papayannis A, et al. Validation of CALIPSO space-borne-derived attenuated backscatter coefficient profiles using a ground-based lidar in Athens, Greece[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, 2(2): 513-522.
- [138] Wu Y H, Cordero L, Gross B, et al. Assessment of CALIPSO attenuated backscatter and aerosol retrievals with a combined ground-based multi-wavelength lidar and sunphotometer measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 84: 44-53.
- [139] Baroni T, Pandey P, Preissler J, et al. Comparison of backscatter coefficient at 1064 nm from CALIPSO and ground-based ceilometers over coastal and non-coastal regions[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(11): 1190.
- [140] Satoh M, Inoue T, Miura H. Evaluations of cloud properties of global and local cloud system resolving models using CALIPSO and CloudSat simulators[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D00H14.
- [141] Kodama C, Noda A T, Satoh M. An assessment of the cloud signals simulated by NICAM using ISCCP, CALIPSO, and CloudSat satellite simulators[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(12): D12210.
- [142] Andersson S M, Martinsson B G, Vernier J P, et al. Significant radiative impact of volcanic aerosol in the lowermost stratosphere[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7692.
- [143] de Guélis T V, Chepfer H, Guzman R, et al. Space lidar observations constrain longwave cloud feedback[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 16570.
- [144] van Tricht K, Lhermitte S, Lenaerts J T M, et al. Clouds enhance Greenland ice sheet meltwater runoff[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10266.
- [145] Mülmstädt J, Salzmann M, Kay J E, et al. An underestimated negative cloud feedback from cloud lifetime changes[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(6): 508-513.
- [146] Huang Y Y, Ding Q H, Dong X Q, et al. Summertime low clouds mediate the impact of the large-scale circulation on Arctic Sea ice[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2: 38.
- [147] Kacimi S, Kwok R. The Antarctic Sea ice cover from ICESat-2 and CryoSat-2: freeboard, snow depth, and ice thickness[J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(12): 4453-4474.
- [148] Kurtz N T, Markus T. Satellite observations of Antarctic Sea ice thickness and volume[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(8): C08025.
- [149] Kern S, Spreen G. Uncertainties in Antarctic Sea-ice thickness retrieval from ICESat[J]. *Annals of Glaciology*, 2015, 56(69): 107-119.
- [150] Petty A A, Kurtz N T, Kwok R, et al. Winter Arctic Sea ice thickness from ICESat-2 freeboards[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2020, 125(5): e2019JC015764.
- [151] Narine L L, Popescu S C, Malambo L. Using ICESat-2 to estimate and map forest aboveground biomass: a first example[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1824.
- [152] Stephens G, Winker D, Pelon J, et al. CloudSat and CALIPSO within the A-train: ten years of actively observing the earth system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(3): 569-581.
- [153] Cesana G, Chepfer H. Evaluation of the cloud thermodynamic phase in a climate model using CALIPSO-GOCCP[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(14): 7922-7937.
- [154] Chen Y C, Christensen M W, Stephens G L, et al. Satellite-based estimate of global aerosol-cloud radiative forcing by marine warm clouds[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(9): 643-646.
- [155] Chakrabarty R K, Beres N D, Moosmüller H, et al. Soot superaggregates from flaming wildfires and their direct radiative forcing[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5508.
- [156] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat mission[J]. *Geophysical Research Letters*,

- 2005, 32(21): L21S01.
- [157] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [158] Kwok R, Markus T, Kurtz N T, et al. Surface height and sea ice freeboard of the Arctic Ocean from ICESat-2: characteristics and early results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124(10): 6942-6959.
- [159] Zhu X X, Wang C, Nie S, et al. Mapping forest height using photon-counting LiDAR data and Landsat 8 OLI data: a case study in Virginia and North Carolina, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106287.
- [160] Li W, Niu Z, Shang R, et al. High-resolution mapping of forest canopy height using machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102163.
- [161] Narine L L, Popescu S C, Malambo L. Synergy of ICESat-2 and landsat for mapping forest aboveground biomass with deep learning[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1503.
- [162] Parrish C E, Magruder L A, Neuenschwander A L, et al. Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1634.
- [163] Ma Y, Xu N, Liu Z, et al. Satellite-derived bathymetry using the ICESat-2 lidar and Sentinel-2 imagery datasets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 250: 112047.
- [164] Lu X M, Hu Y X, Yang Y K, et al. Antarctic spring ice-edge blooms observed from space by ICESat-2[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245: 111827.
- [165] Oikawa E, Nakajima T, Inoue T, et al. A study of the shortwave direct aerosol forcing using ESSP/CALIPSO observation and GCM simulation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(9): 3687-3708.
- [166] Kovilakam M, Mahajan S, Saravanan R, et al. Climate impacts of CALIPSO-guided corrections to black carbon aerosol vertical distributions in a global climate model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10549-10559.
- [167] Christian K, Wang J, Ge C, et al. Radiative forcing and stratospheric warming of pyrocumulonimbus smoke aerosols: first modeling results with multisensor (EPIC, CALIPSO, and CATS) views from space[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(16): 10061-10071.
- [168] Yorks J E, Hlavka D L, Vaughan M A, et al. Airborne validation of cirrus cloud properties derived from CALIPSO lidar measurements: spatial properties[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(D19): D19207.
- [169] Ham S H, Kato S, Rose F G, et al. Cloud occurrences and cloud radiative effects (CREs) from CERES-CALIPSO-CloudSat-MODIS (CCCM) and CloudSat radar-lidar (RL) products[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(16): 8852-8884.
- [170] Huang J F, Guo J P, Wang F, et al. CALIPSO inferred most probable heights of global dust and smoke layers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(10): 5085-5100.
- [171] Kato S, Sun-Mack S, Miller W F, et al. Relationships among cloud occurrence frequency, overlap, and effective thickness derived from CALIPSO and CloudSat merged cloud vertical profiles[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D00H28.
- [172] Su H, Jiang J H, Neelin J D, et al. Tightening of tropical ascent and high clouds key to precipitation change in a warmer climate[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15771.
- [173] 陶雨婷, 赵泓楷, 周雨迪, 等. CALIOP 反演海洋颗粒物后向散射系数方法概述[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(6): 20211037.
- Tao Y T, Zhao H K, Zhou Y D, et al. Overview of inversion methods of ocean subsurface particulate backscattering coefficient by using CALIOP data[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20211037.
- [174] Dionisi D, Brando V E, Volpe G, et al. Seasonal distributions of ocean particulate optical properties from spaceborne lidar measurements in Mediterranean and Black Sea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111889.
- [175] Lu X M, Hu Y X, Trepte C, et al. A super-resolution laser altimetry concept[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(1): 298-302.
- [176] Lu X M, Hu Y X, Liu Z Y, et al. Observations of Arctic snow and sea ice cover from CALIOP lidar measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 194: 248-263.
- [177] 陈炳龙, 杨忠东, 闵敏, 等. 星载多普勒测风激光雷达应用需求与研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 190003.
- Chen B L, Yang Z D, Min M, et al. Application requirements and research progress of spaceborne Doppler wind lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190003.
- [178] Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, et al. Lidar-measured winds from space: a key component for weather and climate prediction[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1995, 76(6): 869-888.
- [179] Weissmann M, Cardinali C. Impact of airborne Doppler lidar observations on ECMWF forecasts[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(622): 107-116.
- [180] Weissmann M, Langland R H, Cardinali C, et al. Influence of airborne Doppler wind lidar profiles near Typhoon Sinlaku on ECMWF and NOGAPS forecasts [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(662): 118-130.
- [181] Huang M, Gao Z Q, Miao S G, et al. Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using Doppler lidar data during SURF-2015[J]. *Boundary-Layer*

- Meteorology, 2017, 162(3): 503-522.
- [182] Schween J H, Hirsikko A, Löhnert U, et al. Mixing-layer height retrieval with ceilometer and Doppler lidar: from case studies to long-term assessment[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(11): 3685-3704.
- [183] Zhang J A, Atlas R, Emmitt G D, et al. Airborne Doppler wind lidar observations of the tropical cyclone boundary layer[J]. Remote Sensing, 2018, 10(6): 825.
- [184] Toumi R, Bekki S, Law K S. Indirect influence of ozone depletion on climate forcing by clouds[J]. Nature, 1994, 372(6504): 348-351.
- [185] Hommel R, Timmreck C, Giorgetta M A, et al. Quasi-biennial oscillation of the tropical stratospheric aerosol layer[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(10): 5557-5584.
- [186] Liu Z L, Barlow J F, Chan P W, et al. A review of progress and applications of pulsed Doppler wind LiDARs[J]. Remote Sensing, 2019, 11(21): 2522.
- [187] 刘良云, 白雁, 孙睿, 等. “全球生态系统碳循环关键参数立体观测与反演”项目概述与研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 11-24.
- Liu L Y, Bai Y, Sun R, et al. Stereo observation and inversion of the key parameters of global carbon cycle: project overview and mid-term progresses[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 11-24.
- [188] Nassar R, Mastrogiacomo J P, Bateman-Hemphill W, et al. Advances in quantifying power plant CO₂ emissions with OCO-2[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 264: 112579.
- [189] Schuh A E, Otte M, Lauvaux T, et al. Far-field biogenic and anthropogenic emissions as a dominant source of variability in local urban carbon budgets: a global high-resolution model study with implications for satellite remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 262: 112473.
- [190] Peters W, Jacobson A R, Sweeney C, et al. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(48): 18925-18930.
- [191] Tian X J, Xie Z H, Cai Z N, et al. The Chinese carbon cycle data-assimilation system (Tan-Tracker)[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(14): 1541-1546.
- [192] Lyapustin A, Wang Y J, Korkin S, et al. MODIS collection 6 MAIAC algorithm[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(10): 5741-5765.
- [193] Mao J P, Kawa S R. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. Applied Optics, 2004, 43(4): 914-927.
- [194] Uchino O, Kikuchi N, Sakai T, et al. Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂: a case study over Tsukuba[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(7): 3393-3404.
- [195] Pincus R, Hemler R, Klein S A. Using stochastically generated subcolumns to represent cloud structure in a large-scale model[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(12): 3644-3656.
- [196] Barker H W, Jerg M P, Wehr T, et al. A 3D cloud-construction algorithm for the EarthCARE satellite mission[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(657): 1042-1058.
- [197] Liu D, Chen S J, Cheng C H, et al. Analysis of global three-dimensional aerosol structure with spectral radiance matching[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(12): 6541-6556.
- [198] Bettenhausen C, Sayer A M, Hsu N C, et al. Retrieving the height of smoke and dust aerosols by synergistic use of VIIRS, OMPS, and CALIOP observations[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2015, 120(16): 8372-8388.
- [199] Sun X J, Li H, Barker H, et al. Satellite-based estimation of cloud base heights using constrained spectral radiance matching[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 142(694): 224-232.
- [200] Chen S J, Cheng C H, Zhang X Y, et al. Construction of nighttime cloud layer height and classification of cloud types[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 668.
- [201] Han B. Collaborative regression on aerosol optical thickness from heterogeneous remote sensing data[J]. International Journal of Future Generation Communication and Networking, 2016, 9(10): 339-350.
- [202] Lee J, Shi Y R, Cai C J, et al. Machine learning based algorithms for global dust aerosol detection from satellite images: inter-comparisons and evaluation[J]. Remote Sensing, 2021, 13(3): 456.
- [203] Kox S, Bugliaro L, Ostler A. Retrieval of cirrus cloud optical thickness and top altitude from geostationary remote sensing[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(10): 3233-3246.
- [204] Bills B G, Borsa A A, Comstock R L. MISR-based passive optical bathymetry from orbit with few-cm level of accuracy on the Salar de Uyuni, Bolivia[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 107(1/2): 240-255.
- [205] Duan Z, Bastiaanssen W G M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134: 403-416.
- [206] Arsen A, Crétaux J F, Berge-Nguyen M, et al. Remote sensing-derived bathymetry of lake poopo[J]. Remote Sensing, 2013, 6(1): 407-420.
- [207] Li Y, Gao H L, Jasinski M F, et al. Deriving high-resolution reservoir bathymetry from ICESat-2 prototype photon-counting lidar and landsat imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(10): 7883-7893.
- [208] le Quilleuc A, Collin A, Jasinski M, et al. Very high-resolution satellite-derived bathymetry and habitat mapping using Pleiades-1 and ICESat-2[J]. Remote Sensing, 2021, 14(1): 133.
- [209] Zhang X H, Chen Y F, Le Y, et al. Nearshore bathymetry based on ICESat-2 and multispectral images:

- comparison between sentinel-2, landsat-8, and testing Gaofen-2[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 2449-2462.
- [210] Xie C S, Chen P, Pan D L, et al. Improved filtering of ICESat-2 lidar data for nearshore bathymetry estimation using sentinel-2 imagery[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13 (21): 4303.
- [211] Gleason A C R, Smith R, Purkis S J, et al. The prospect of global coral reef bathymetry by combining ice, cloud, and land elevation satellite-2 altimetry with multispectral satellite imagery[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8(1): 694783.
- [212] Lee Z P, Shanguan M J, Garcia R A, et al. Confidence measure of the shallow-water bathymetry map obtained through the fusion of lidar and multiband image data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 2021(1): 9841804.
- [213] Thomas N, Pertiwi A P, Traganos D, et al. Spaceborne cloud-native satellite-derived bathymetry (SDB) models using ICESat-2 and Sentinel-2[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(6): e2020GL092170.
- [214] Hirschberg J G, Byrne J D. Rapid underwater ocean measurements using Brillouin scattering[J]. *Proceedings of SPIE*, 1984, 0489: 270-276.
- [215] Leonard D A, Sweeney H E. Remote sensing of ocean physical properties: a comparison of Raman and Brillouin techniques[J]. *Proceedings of SPIE*, 1988, 0925: 407-414.
- [216] Hair J, Hostetler C, Hu Y X, et al. Combined atmospheric and ocean profiling from an airborne high spectral resolution lidar[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 22001.
- [217] Zhou Y D, Liu D, Xu P T, et al. Retrieving the seawater volume scattering function at the 180° scattering angle with a high-spectral-resolution lidar[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11813-11826.
- [218] Schulien J A, Behrenfeld M J, Hair J W, et al. Vertically-resolved phytoplankton carbon and net primary production from a high spectral resolution lidar[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13577-13587.
- [219] CCTV News. Project of "Research on Mechanism and Model of Ocean Optical Remote Sensing" completed the autumn joint voyage with all lidars independently developed [EB/OL]. [2020-07-07]. <http://m.news.cctv.com/2020/09/28/ARTIOFM7qiGRW2AlpRB8zYyB200928.928.shtml>.
- 央视新闻. 激光雷达全部自主研发“海洋光学遥感探测机理与模型研究”项目完成秋季联合共享航次[EB/OL]. [2020-07-07]. <http://m.news.cctv.com/2020/09/28/ARTIOFM7qiGRW2AlpRB8zYyB200928.shtml>.
- [220] Zhou Y, Chen Y, Zhao H, et al. Shipborne oceanic high-spectral-resolution lidar for accurate estimation of seawater depth-resolved optical properties[EB/OL]. [2022-07-07]. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00951-0>.
- [221] Liu R R, Ling Q L, Zhang Q B, et al. Detection of chlorophyll a and CDOM absorption coefficient with a dual-wavelength oceanic lidar: wavelength optimization method[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 3021.
- [222] 汪自军, 张扬, 刘东, 等. 新型多波束陆海激光雷达探测卫星技术发展研究[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(7): 20211041.
- Wang Z J, Zhang Y, Liu D, et al. Research on the development of detection satellite technology in the novel multi-beam land and ocean lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20211041.
- [223] Pardini M, Armston J, Qi W L, et al. Early lessons on combining lidar and multi-baseline SAR measurements for forest structure characterization [J]. *Surveys in Geophysics*, 2019, 40(4): 803-837.
- [224] Shu R, Huang G H, Hou L B, et al. Multi-channel photon counting three-dimensional imaging laser radar system using fiber array coupled Geiger-mode avalanche photodiode[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8542: 85420C.
- [225] Li Z H, Wu E, Pang C K, et al. Multi-beam single-photon-counting three-dimensional imaging lidar[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10189-10195.
- [226] Malik M, Magaña-Loaiza O S, Boyd R W. Quantum-secured imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101 (24): 241103.
- [227] Xia H Y, Shentu G L, Shanguan M J, et al. Long-range micro-pulse aerosol lidar at 1.5 μm with an upconversion single-photon detector[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1579-1582.
- [228] Høgstvedt L, Fix A, Wirth M, et al. Upconversion-based lidar measurements of atmospheric CO₂[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5152-5161.
- [229] Xia H Y, Shanguan M J, Wang C, et al. Micro-pulse upconversion Doppler lidar for wind and visibility detection in the atmospheric boundary layer[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5218-5221.

约稿专家简介:



刘东(1982—),博士,教授/博士生导师,教育部“长江学者奖励计划”青年学者。2001年考入浙江大学光电信息工程学系信息工程(光电)专业学习,2005年6月本科毕业获学士学位;之后直接攻读光学工程专业博士学位,2010年毕业并获博士学位。现任浙江大学光电科学与工程学院副院长、现代光学仪器国家重点实验室副主任、中国光学工程学会理事、《大气与环境光学学报》执行副主编、《光学学报》等期刊编委。长期从事光电检测与遥感方面的教学及科研工作,主要研究方向包括环境激光雷达(大气、海洋及星载)、光学元件缺陷检测等。主持国家重点研发计划项目1项、国家自然科学基金项目3项,出版教材2部、专著1部。E-mail:liudongopt@zju.edu.cn。