

星载主动遥感气溶胶-云参数技术需求与进展*

王 倩^{1,2,3}, 毕研盟¹, 刘成保¹, 杨忠东¹

(1 国家卫星气象中心 北京 100081

2 中国科学院合肥物质研究院安徽光学精密机械研究所环境光学研究中心 合肥 230031

3 中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要: 面对越来越迫切的气象和气候预测及大气环境监测需求, 利用主动星载仪器在全球范围内探测云和气溶胶参数成为快速发展的研究领域。相比被动遥感仪器, 主动仪器可以获取云和气溶胶参数的垂直分布信息, 这将在天气气候模式的改进方面发挥重要作用。通过云和气溶胶遥感需求分析, 从雷达数据应用角度, 首先介绍了数值模式对云和气溶胶的科学参数需求和定量需求, 进一步分析了云和气溶胶联合观测的需求, 以及星载微波激光雷达的探测特点; 然后对国内外正在规划的星载云和气溶胶微波激光雷达探测任务进行了综述, 包括仪器指标和数据产品设计; 最后展望这一领域的应用前景。

关键词: 星载微波-激光复合雷达; 科学需求; 云; 气溶胶

中图分类号: P412.25 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2020)06-0001-11

Requirement and progress of space-based active remote sensing for aerosol and cloud

WANG Qian^{1,2,3}, BI Yanmeng¹, LIU Chenbao¹, YANG Zhongdong¹

(1. National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China;

2. Center of Environmental Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Facing the urgent needs for meteorological and climate prediction and atmospheric environment monitoring, the use of active spaceborne instruments to detect global clouds and aerosols has become a rapidly developing research field. Compared with passive remote sensing technologies, active instruments could obtain profiles of cloud and aerosol parameters, which play an important role in improving weather and climate models. In this paper, the scientific requirements for cloud and aerosol remote sensing are discussed out. First, the application and quantitative demands of number models for the cloud and aerosol measurements for models are introduced from the perspective of radar data application. Further, the requirements for joint observation of clouds and aerosols, and the detection characteristics of spaceborne microwave lidar radar are analyzed. In addition, the planned mission for spaceborne lidar and millimeter-wave radar for cloud and aerosol remote sensing including instrument specifications and product designs are reviewed. Finally, the future development of this field is also presented.

Key words: Space-based multiplex microwave and laser radar; Scientific requirement; Cloud; Aerosol

引 言

大气中的云和气溶胶是影响地气系统能量平衡的重要因子。云和气溶胶可以将入射太阳辐射反射回太空, 也可以捕获向外的热辐射。云对大气的加热和冷却作用非常复杂。气溶胶一方面可以通过吸收和散射太阳辐射直接影响辐射平衡, 另一方面可以作为云凝结核, 影响云的光学特性、云量和云生命周期, 间接影响云的辐射效应。目前, 对间接辐射强迫的估计还有很大的不确定性。因此, 进一步

*基金项目: 民用航天技术预先研究项目(D040301)

收稿日期: 2020-07-27 收修改稿日期: 2020-10-15

理解云、气溶胶和辐射之间的关系, 改进模式是气候研究和天气预报中的首先任务。

主动仪器在探测全球尺度上的云和气溶胶特性, 特别在垂直分布信息的获取上具有独特的优势。采用主动微波激光雷达探测的方式获取的资料有助于评估当前预报模式, 比较多种云、气溶胶参数化方案, 判断各种参数化方案的误差^[1], 成为未来星载云和气溶胶遥感的主要发展方向。

文献[2]从遥感器发展技术角度综述了星载雷达探测云和气溶胶的发展趋势, 本文重点论述了星载微波激光雷达在云和气溶胶探测方面的科学需求, 总结了模式对气溶胶和云探测参数的定量需求, 分析了云和气溶胶联合观测需求以及星载微波激光雷达的探测特点, 最后介绍了国内外星载激光微波雷达探测任务的发展计划和可能的定量数据产品。

1 科学需求

1.1 气溶胶参数

气溶胶是地球环境系统的组成部分, 它与自然过程和人为活动相互影响。不同成因的气溶胶的吸收特性、散射特性、化学成分、形状、寿命和空间分布特征各不相同^[3], 按来源可分为天然气溶胶和人为气溶胶。不同来源的气溶胶在空间和时间上共存, 因此通常呈多模态分布。降水、湍流混合和重力沉降通常会在一周内清除对流层中的气溶胶, 将其沉积在偏远地区, 从而改变这些区域的冰雪反照率^[4]。

气溶胶主要通过反射太阳辐射使地表降温, 直接改变地球的辐射收支平衡。水溶性粒子可以充当云凝结核, 增加云内液滴数量、液态水含量和云反照率, 间接导致地球冷却。烟雾和一些矿物粉尘吸收太阳辐射, 局部加热大气, 改变大气的稳定性结构。若这些吸收性气溶胶存在于云层中, 则可能导致液滴蒸发, 抑制云的产生。

气候模式的气溶胶模块需要全面考虑人为因素和火山事件引起的气溶胶变化, 才可以准确模拟过去一个世纪观测到的地表温度变化。但是, 气溶胶对区域气候的影响比对全球平均气候的影响显著得多。模式和观测结果表明, 气溶胶影响区域性的降水量和降水分布, 并改变大气环流。在过去的四十年中, 随着卫星探测能力的提高和气溶胶模式的改进, 我们对气溶胶环境效应的认识日益增强。

目前, 星载仪器的气溶胶探测还存在一些不足, 例如, 气溶胶垂直分布的日间探测噪声很大; 当前的探测方式观测到的气溶胶特性具有较大的不确定性, 特别在有云的干扰时探测精度会严重下降, 从而导致气溶胶-云-降水研究的不确定性; 现全球仅存一部具有垂直探测能力的星上激光雷达在轨运行, 这限制了全球模式中多种探测数据的有效同化。

为了实现对区域和全球气溶胶影响的定量评估, 模式将向多种气溶胶类型、数量和尺度分布模拟的方向发展, 因此, 除气溶胶光学厚度, 还需要获取全球尺度的气溶胶特性参数及其垂直分布特性^[5]。

综上, 气溶胶探测的科学需求主要是气溶胶直接和间接辐射强迫及源汇输送相关的科学问题。解决以上问题, 需要结合卫星和地面观测, 获取全球的气溶胶水平和垂直分布、及气溶胶光学、微物理和化学特性。尽管来自 A-Train 和 Terra 的卫星仪器已开始提供此类探测, 但是对于应用而言, 这些关键参数的探测还存在缺失或者误差过大的问题。在传统被动成像探测的基础上, 使用先进的主动激光雷达和偏振类仪器的结合可以补充并优化这些参数。

1.2 云参数

在气候强迫的研究中, 气溶胶对云的影响是不确定性的主要来源之一。气候系统中强迫和反馈的物理过程由循环机制、微物理尺度上的物理过程驱动。这些微物理过程不能显式地出现于气候模式中, 而是依靠参数化的方式应用于模式中。发展模式并评价云微物理参数化方案需要更先进的全球尺度的探测数据。

在云和降水的研究中, 明确云和降水的生成过程才可以加深对气候的认识、预测水循环的变化。为此, 我们需要进行大量的云、气溶胶和降水特性观测, 以进一步理解气溶胶、云和降水在大气中相互作用和演化的物理过程。大气中的气溶胶、云和降水是以不同大小的粒子和分布形式存在的, 物理云和光学云性质的演化是通过这些分布的变化来实现的, 因此, 获取粒子的垂直分布和尺度分布信息,

同时了解云的辐射和宏观物理性质、云的垂直运动以及对应的热力和动力环境将在云和降水研究中发挥积极作用。

卫星遥感仪器可以在垂直方向上探测一些对粒子尺度分布敏感的物理量,例如,CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 搭载的激光雷达获得的后向散射信息,MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 的光学厚度产品等,但这些产品的获取通常需要先验信息作为补充,这大幅增加了反演的不确定性,导致较大的反演偏差,这是目前卫星遥感云微物理特性的难点所在。理解辐射相关的物理过程需要充足的气溶胶、云和降水粒子谱分布信息,可以通过协同观测的方法来实现。

云系的时空尺度和特点各不相同,探测需求具有显著差异。由于不同云系的粒子尺度、数密度、含水量等微物理特性各具特点,造成它们的辐射效应有正有负,从而在天气、气候中的作用也完全不同。云可以通过辐射、潜热和对流强迫三种方式影响气候并参与全球水循环^[6]。例如,卷云在对流层上部加热大气,辐射效应显著,但它的含水量和大粒子的浓度都较低,卫星探测具有很大挑战。对于深对流云,通过潜热释放和云辐射强迫影响辐射平衡,由于云微物理过程和气溶胶对对流和对流降水的宏观特性影响很大,需要通过卫星探测的云和气溶胶的微物理参数,以详尽理解气溶胶和降水之间的关系。边界层内的层积云和积云具有制冷效应,并且对气溶胶的影响敏感,因此,云和气溶胶微物理参数的监测对了解云-气溶胶相互影响的机制非常关键。中纬度气旋在热带和极区间的能量输送中扮演重要角色,而气候模式对中纬度气旋系统的模拟却不够完善,因此,卫星遥感中纬度锋面云对气候系统能量平衡方面研究具有重要意义。另外,对于极区气候变化研究,观测和模拟都依赖于极区云微物理特性和云与气溶胶相互作用的理解,由于极区远离人类活动区域,卫星遥感是重要的观测手段。

1.3 气溶胶和云的相互作用

云、气溶胶和辐射之间的相互作用是气候系统中最大的不确定性源之一,也是气候研究和预测中极具挑战的难点问题^[7]。

云和气溶胶通过影响气候的方式紧密耦合^[8]。云通过将气溶胶及反应性气体向上运输、控制云滴中生成气溶胶的水溶性物质、通过降水消除气溶胶这几种方式来影响气溶胶,改变气溶胶的浓度和垂直分布,并对地球能量平衡产生直接影响^[9]。

气溶胶可以作为云滴冰晶凝结核,也可以吸收太阳辐射加热大气、冷却地表从而影响云的形成。凝结核决定了云滴数浓度,影响云滴谱;云滴大小通过云粒子的表面积改变云光学性质,通过影响沉降和碰并过程,改变降水和水含量。气溶胶可以改变云中的上升和下沉气流强度。冰核与冰晶的形成、沉降和降水有关。人为气溶胶作凝结核会引起云特性的变化,改变云的辐射强迫效应,这是气溶胶对能量收支平衡的间接效应^[10]。

云内吸收性气溶胶可吸收太阳辐射,这种加热效应会抑制凝结,减少水含量,也减少从地表通过湍流输送进入云内的水汽。这种效应也会驱动循环,从而增加区域性湿度的辐合和降水,并减少地表蒸发,进而减少全球降水。卫星观测和理论模拟表明,气溶胶-云相互作用可以导致云降水从慢到快的快速转变,但是目前对这一转变机制了解甚少。

人为气溶胶对云的作用产生了相当重要的辐射强迫,但是相比温室气体而言,不确定性极大,对于降水的影响更是未知。

卫星观测可以获取产生核化作用的气溶胶数浓度和云内气溶胶物理和光学特性的垂直分布^[11],模式可以模拟云和气溶胶与辐射强迫、降水的关系,二者结合可以深化云和气溶胶相互作用的认知,量化气溶胶在辐射平衡、云和降水等科学问题中的具体影响。

2 模式对气溶胶和云探测的定量需求

在天气和气候系统中,云和气溶胶的相关研究通常使用卫星资料与数值模拟相结合的方法。气候模式中,自然源和人为源的处理方式不同,人为源强迫是通过模拟存在和不存在人为排放进行比较或

者通过模拟源随时间的变化进行估计。人为气溶胶强迫的早期模式模拟结果差异很大, 在结合使用卫星资料后, 模拟结果趋于一致。卫星和地面观测提供的气溶胶、云分布和微物理参数通过修正排放因子、清除系数等不确定性参数减小模式偏差。虽然目前模式结果趋好, 但是依然有很大的不确定性, 卫星观测提供的气溶胶、云分布和微物理参数, 可以更有效地优化模式、评估结果^[12]。

2.1 测量精度需求

做好气候模式和数值天气预报模式的优化, 需要进一步理解对云-气溶胶-辐射相互作用, 具体包括气溶胶、云和云内粒子的垂直分布特征及其辐射效应。

理解云-气溶胶辐射特性和相互作用的关键在于获取准确的气溶胶消光参数、气溶胶吸收参数、大尺度的云结构、云凝结核含量、粒子尺度、相态以及小尺度的云结构。气溶胶作为云凝结核与云特性密切相关, 因此, 云参数的宏观和微观特性主要是由气溶胶的物理和化学特性决定的。在云和气溶胶辐射特性方面的具体参数需求见表 1。

在模式参数化中, 云在垂直方向上的重叠是一个重要参数, 它通常是一个假设量, 但可以从星载雷达探测得到的云参数获取重叠信息^[13]。目前, 模式对云层内垂直速度、冰晶的下降速度或沉降速率的处理通常是假设或者模拟的, 因此, 若星载雷达能探测得到相关参数, 对改进模式精度具有重要价值。云特性参数的具体精度需求^[14,15]如表 2 所示。

气溶胶参数的基本需求是气溶胶光学厚度廓线。结合其它信息, 光学厚度廓线可以转换成气溶胶含量和尺度等参数。对气溶胶类型而言, 即使只能做到吸收和非吸收性质的区分, 也是极具价值的。因为边界层中存在大量气溶胶, 所以探测气溶胶高度也可以提供边界层厚度的信息。气溶胶特性参数的精度需求^[14,15]如表 3 所示。

2.2 模式对卫星观测分辨率的需求

气候模式和数值天气预报模式中的云通常是为了计算降水分布和热辐射的垂直分布。模式不能直接分辨云, 因此, 需要利用理论或者观测的统计关系, 在次网格尺度上进行参数化。气溶胶的处理过程与云类似。目前, 气候模式和数值天气预报模式的水平和垂直分辨率的需求值见表 4。对区域模式而言, 若其分辨率达到 1km 的尺度, 则可以分辨对流或者强风暴过程, 也可以实现模式和卫星观测的直接比较^[16]。因此, 为了准确分辨云的动力结构、小尺度云和气溶胶层等物理过程, 星载雷达需要具有足够高的分辨率。仪器分辨率的提高不仅可以最小化非线性效应, 也可以在次网格尺度上得到云和气溶胶数量的统计特征。

表 1 云和气溶胶的光学参数需求

Table 1 The requirements for aerosols and clouds

| 云 | 气溶胶 |
|---------|-----------|
| 云反照率 | 气溶胶粒子数密度 |
| 云粒子有效半径 | 气溶胶粒子有效半径 |
| 云粒子数浓度 | 气溶胶化学成分 |
| 液态水路径 | 气溶胶吸收光学厚度 |
| 云内上升速度 | |

表 2 云特性参数的精度需求

Table 2 The accuracy requirements for clouds

| 特性参数 | 精度需求 |
|--------|----------------------|
| 云顶/底高度 | 200m |
| 云滴有效半径 | 1 μ m |
| 云冰 | 20% |
| 云液态水 | 20% |
| 云量 | 5% |
| 云冰总量 | 5 g·m ⁻² |
| 云液态水总量 | 10 g·m ⁻² |

表 3 气溶胶特性参数的精度需求

Table 3 The accuracy requirements for aerosols

| 特性参数 | 精度需求 |
|---------|------|
| 质量混合比廓线 | 10% |
| 垂直分辨率 | 200m |

表 4 云和气溶胶参数在气候和数值天气预报模式的分辨率的需求

Table 4 The resolution requirements for cloud and aerosol parameters in climate models and numerical weather forecast models

| 参数 | 气候模式 | 数值天气预报模式 | 区域模式 |
|----------------|------|----------|------|
| 水平分辨率/km | 100 | 25 | 2 |
| 垂直层数 | 80 | 100 | 100 |
| 垂直分辨率(上层对流层)/m | 750 | 500 | 500 |
| 垂直分辨率(边界层)/m | 100 | 30 | 50 |

3 云-气溶胶联合观测需求

气溶胶-云相互作用的主要过程是通过气溶胶成为云凝结核和冰核,改变云的微物理和辐射特性实现的。目前,气溶胶的这种间接效应还难以用观测数据描述,因为这些导致气溶胶间接效应的微物理过程发生在气溶胶演变成云滴、降水的过程中,并且在几百米的云垂直深度中发生迅速变化^[17]。观测和模式的结果显示,云和气溶胶相互作用的关系大部分是关于气溶胶的增加引起云滴凝结核增加、云滴变小^[18]。卫星观测数据分析结果表明海洋型、沙尘型、污染型气溶胶会使云滴变小^[19,20]。但陆地上也可能出现气溶胶粒子增加使云滴增大的效应^[21]。在云的宏观物理量上,有研究表明,气溶胶粒子的增加可能会增长云的生命时间,使云层变厚、云覆盖度增加,但也有研究指出,气溶胶粒子的增加会导致云量减少。因此,在云和气溶胶相互作用的研究中还存在很大的不确定性。此外,一些特殊云类型的微物理和辐射性质的研究也需要联合气溶胶观测。例如,有学者结合 A-Train 编队中 Cloudsat 和 CALIPSO 资料判断云周围沙尘气溶胶的存在,研究沙尘区的云辐射特性,云-气溶胶的联合观测对沙尘云的初步挑选提供了重要信息^[22]。在模式的应用中,卫星探测到的数据必须同时包含云和气溶胶参数才可以被同化进入模式,分辨出云内粒子的运动和过程。因此,联合探测全球云-气溶胶参数具有重要意义。

一方面,气溶胶的间接效应还难以用观测数据描述,基于卫星、地面观测和大尺度模式模拟开展的云和气溶胶相互作用的研究结果差异非常大。云和气溶胶相互作用受到云类型、气溶胶类型、降水类型等多种因素的影响,不同条件下的云和气溶胶相互作用截然不同。气溶胶对云的间接影响在对边界层内的云影响尤为显著。气溶胶、浅层云与降水之间存在动态反馈,这种动态反馈也会调节云场中气溶胶的间接效应。有研究表明,在气溶胶浓度较高的大气背景下,云层变得更深,云内下沉气流更强^[23]。文献[24]中利用模式模拟了潮湿和干燥条件下,洁净大气和污染大气中云的发展演变特征,模拟结果显示,在污染大气中生长的云,凝结、沉积、蒸发和升华都比在洁净大气中的云的演变特征显著。

另一方面,云具有很大的自然变率,气溶胶和这些引起云变化的自然因素共同作用于云的微物理特性,其中一个因素的改变引发的其他变量的响应通常不是线性的。因此,揭示气溶胶的间接效应迫切需要实现云和气溶胶的联合观测,研究不同气溶胶浓度水平下云的变化响应^[17]。

由于云的寿命不超过 15 分钟,对于一些分布零散的小尺度云团,以及造成局地天气的小尺度强对流云更具有发展速度快的特点^[22]。星载微波激光雷达的联合探测可以确保两个仪器的视场目标在时间和空间上保持一致,这对结合气溶胶-云探测参数研究同一区域的云非常关键。因此,实现云和气溶胶的联合探测,特别是共平台探测,可以为云微物理和辐射效应的研究提供重要的数据支撑。

4 星载微波激光雷达的探测特点及数据应用

微波雷达与激光雷达探测的对象不同。微波雷达用于探测大气中厚云的垂直结构以及降水信息,它能够穿透光学厚云探测到云底,但对小粒子敏感性低,对地面到 1km 高度的目标不具有探测能力。激光雷达的探测目标是薄云和气溶胶及其垂直结构,可以准确获取云顶高度,同时对大气中光学薄云敏感,可探测薄卷云和极地平流云。

微波雷达和激光雷达仪器的单独使用具有一些局限性。比如:①微波雷达对地面到 1km 高度的目标不具有探测能力,同时由于水平分辨率和垂直分辨率的限制,对小尺度云的敏感性较低,例如,Cloudsat 的垂直分辨率为 480m,卷云厚度主要分布在 0.3km~1.5km。②微波雷达的最小可探测信号决定了它对液态水云的探测能力,以 Cloudsat 为例,-30dBz 的最小探测灵敏度对对流层中部的非降水性液态水云以及卷云都不敏感。③激光雷达探测光学厚云时能量衰减很大,同时,受发射能量强度的限制,日间工作的灵敏度低于夜间。

微波雷达和激光雷达的联合探测可以在一定程度上解决上述问题,联合反演可以获得准确的云廓

线、云中冰水含量、云内云滴和冰晶的有效半径以及云分类产品。但当雷达反射率很弱或者水汽层存在于 1km 以下时, 较高的光学厚云之下的水汽层信息仍然可能缺失。虽然目前的微波激光雷达的融合产品只在两者共同观测的区域才能有效反演, 但这种联合探测获取的云参数信息仍然是迄今为止最全面的。

从云的宏观分布特征来看, 星载微波激光仪器探测全球云和气溶胶是具有可行性的。云在全球的分布是不均匀的, 但是具有区域性特征^[25]。不同类型的云辐射强迫效应不同, 低云具有冷却效应, 高云具有增暖效应, 因为它们的辐射效应相反, 云垂直分布的变化都会导致净辐射强迫的差异。ISCCP (The International Satellite Cloud Climatology Project) 方法联合云顶气压和云光学厚度将云分为积云 (Cu)、层积云 (Sc)、层云 (St)、高积云 (Ac)、高层云 (As)、雨层云 (Ns)、卷云 (Ci)、深对流云 (DC) 共 8 类, 表 5 给出了不同云类型的一些基本特征。根据云底高度, 云进一步被分为低云、中云和高云。通常, 认为云底高度在 2km~3km 的云为低云, 例如 Sc、St 和 Cu; 云底高度在 2km~7km 的云为中云, 例如 Ac、As 和 Ns; 云底高度在 7km 以上的云为高云, 如 Ci。

表 5 主要云类型的基本特征

Table 5 Characteristic cloud features for major types of clouds

| 云类型 | 云底高度 (km) | 水平尺度 (km) | 垂直尺度 (km) | 降水 |
|-----------|-----------|-----------------------|-----------|---------|
| 卷云 (Ci) | >7 | 10 ³ | 中等 | 无 |
| 高层云 (As) | 2~7 | 10 ³ (均匀) | 中等 | 无 |
| 高积云 (Ac) | 2~7 | 10 ³ (非均匀) | 浅/中等 | 雨幡 |
| 层云 (St) | 0~2 | 10 ² (均匀) | 浅 | 无或轻微 |
| 层积云 (Sc) | 0~2 | 10 ³ (非均匀) | 浅 | 毛毛雨或雪 |
| 积云 (Cu) | 0~3 | 1, 孤立的 | 浅/中等 | 毛毛雨或雪 |
| 雨层云 (Ns) | 0~4 | 10 ³ | 厚 | 长时间降水或雪 |
| 深对流云 (DC) | 0~3 | 10 | 厚 | 强降水或冰雹 |

微波激光雷达探测通常可以获得云廓线 (云顶、云底高度)、云分类、云光学厚度、云水含量垂直分布、云冰含量垂直分布等产品。云廓线、云分类等云宏观特征的反演首先需要通过聚类分析识别云, 根据有云像元是否彼此连续, 将有云像元划分为不同的云层 (若它们之间的距离超过 500m), 水平连续的云层代表一个云簇。根据云系特征, 一轨观测数据被分为不同的云簇。然后进一步将云簇分类, 得到云分类产品。对不同类型的云, 云水平尺度定义为有云象元水平连续廓线的数量与沿轨廓线采样分辨率的乘积。不考虑云类型的云水平尺度定义为两个晴空边界之间的连续有云象元尺度。

由表 5 可见, 云的水平尺度从几千米到几千千米, 水平均匀性和垂直尺度也差异显著, 因此, 星载仪器的一次探测只能覆盖云的一部分, 这样的局部观测信息无法代表整个云。但数据的实际应用中, 云宏观、微观特性的研究通常需要结合多源资料获取的云类型、大气背景场、云微物理、光学参数等多重因素共同分析, 分析数据常为多源卫星、地面资料的匹配区域的观测数据, 或者经过统计、采样算法将数据调整到合适分辨率后的再处理数据。

仪器的幅宽会影响探测数据的覆盖范围和准确度。一方面, 由于星载测云雷达的幅宽限制, 只能对沿轨方向的云进行观测, 增大幅宽有利于获取跨轨方向的云信息, 同时减小全球覆盖时间。另一方面, 一些云的水平尺度很小且分布零散, 需要仪器探测像元的水平分辨率小于云的尺度, 才可以将云从大气背景中分辨出来, 幅宽过大会降低仪器对云的识别能力。因此, 仪器幅宽配置需要考虑探测目标、精度、时空分辨率需求等多方面的因素综合分析。

5 星载激光-微波雷达云-气溶胶探测计划

CloudSat 任务是国际上第一个星载云雷达任务, 发射于 2006 年 4 月 28 日, 搭载的 94GHz 的毫米

波雷达 CPR (Cloud Profiling Radar), 可以探测云量、云分布、云结构和云的辐射特性。CloudSat/CPR 比天气雷达的敏感性高 1000 倍, 因此, 可以探测雨滴和冰粒子, 而厘米波地基天气雷达通常只能探测雨滴尺度的粒子。CloudSat/CPR 可获取雷达后向散射廓线、云几何廓线、云分类、云水含量、云光学厚度等产品。

CALIPSO 是结合主动和被动观测于一体的卫星任务, 它搭载了三个仪器, 主动激光雷达 CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)、红外成像仪 IIR (Imaging Infrared Radiometer) 和宽视场相机 WFC (Wide Field Camera), 用于云和气溶胶垂直结构的探测。CALIPSO/CALIOP 激光雷达通过后向散射和偏振能力的探测, 可获得气溶胶和云的垂直分布信息, 气溶胶的消光廓线、气溶胶光学厚度、气溶胶类型、云高、云厚、云相态、云光学厚度及卷云粒子尺度等产品。这些产品为改善天气和气候预测提供了重要信息。CALIPSO 任务也在 2006 年 4 月 28 日发射, 它和 CloudSat 任务一起在 A-Train 轨道飞行, 目标是实现 CALIPSO 和 CloudSat 卫星传感器的协同观测, 获取高精度的云微物理参数和云的垂直信息, 获取较单颗卫星观测更多的大气信息。

CloudSat 与 CALIPSO 任务虽然在同一个 A-Train 编队飞行, 但它们在各自独立的平台上, 由于云在 1km 以上的尺度范围具有很强的可变性, 即使它们跨轨距离仅为 2km, 在联合反演时也可能引入误差, 尤其在反演有效粒子尺度和冰水含量时引入的误差更大。因此, 星载激光微波联合探测任务是未来的一大发展方向。

5.1 欧洲的计划 and 进展

欧空局和日本宇航局联合提出了 EarthCARE (The Earth Cloud, Aerosol and Radiation Explorer) 任务, 计划于 2021 年发射, 运行在 394km 的太阳同步轨道, 轨道倾角为 97°, 降轨观测, 过境时间为 14:00, 重访周期为 25 天, 载荷寿命大于 3 年。任务目标是深化云、气溶胶和辐射相互作用的理解。EarthCARE 任务计划搭载 4 台载荷, 大气激光雷达 ATLID (Atmospheric Lidar)、云廓线雷达 CPR (Cloud Profiling Radar)、多光谱成像仪 MSI (Multispectral imager) 和宽波段辐射计 BBR (broadband radiometer)^[26], 其中, 大气激光雷达 ATLID 和云廓线雷达 CPR 是探测云和气溶胶的两个主要载荷。EarthCARE/ATLID 在星下方向探测薄云和气溶胶层的垂直分布, 分辨云和不同类型的气溶胶。在 20km 以下高度的垂直分辨率为 100m, 20km~40km 高度的垂直分辨率为 500m, 关键指标参数见表 6。EarthCARE/CPR 将是第一台具有多普勒观测能力的星载大气探测雷达, 工作频段在 94GHz, 它的脉冲信号可以穿透低层厚云, 并探测到地面以下 1km 的高度范围^[7]。EarthCARE/CPR 可以在沿轨方向探测厚云的垂直结构, 得到云的微观和宏观特性, 还可以探测云内粒子的垂直速度, 从而进一步理解对流、冰和雨的降落速度, 改善毛毛雨、降雨和降雪率的预报, 其指标参数见表 7。

EarthCARE 卫星任务解决了单个观测平台观测时间和空间不同步的问题, 通过探测云和气溶胶的宏观和微观参数, 可以得到沿轨方向的云和气溶胶的垂直结构和水平结构特征, 这些参数有助于评估和改进大气模式中的云方案, 也可以用于数值天气预报模式中, 云廓线对天气预报的改进情况。

相比目前在轨运行的星载云和气溶胶探测仪器 Cloudsat 和 CALIPSO, EarthCARE 任务的载荷在性能方面有一定提升。一方面, EarthCARE/CPR 任务相比 CloudSat/CPR 的优势在于: 第一, 由于天线较大且轨道较低, EarthCARE/CPR 的灵敏度几乎提高了 10 倍, 因此, 可以更有效地探测到云; 第二,

表 6 EarthCARE/ATLID 载荷指标
Table 6 The specifications for EarthCARE/ATLID

| 参数 | 指标 |
|------------|---|
| 波长 | 354.8nm |
| 发射能量 | 38Mj |
| 接收器激光足印 | ≤30m |
| 发射频率 (PRF) | 51Hz |
| 发射脉冲宽度 | 20ns |
| 高度范围 | -0.5km~40km |
| 垂直分辨率 | 100m |
| 水平分辨率 | 285m |
| 动态范围 | 1.0e-7~9.61e-3 sr ⁻¹ m ⁻¹ |
| 辐射稳定性 | 1% |

EarthCARE/CPR 将具有额外的多普勒探测能力, 分辨率最高可达 0.2m/s, 因此, 它可以探测对流运动(包括穿透对流层顶的运动)和卷云中冰粒的沉降速度, 并获得更精确的细雨降雨率。另一方面, EarthCARE/ATLID 除了具有和 CALIPSO 类似的后向散射和偏振探测能力外还有独特优势, 例如, EarthCARE/ATLID 具有高光谱分辨率的特性, 可以分离瑞利散射和米散射信号, 从而实现对边界层气溶胶的光学厚度的探测, 也可以独立获取消光廓线和后向散射系数廓线, 计算后可得到气溶胶和冰晶特性的垂直分布信息。

5.2 美国的计划和进展

美国航天局 NASA 也提出了气溶胶、云和生态系统 ACE (Aerosol-Cloud-Ecosystem) 探测任务, 设计运行在 450km 的太阳同步轨道, 轨道倾角 97°, 升轨观测, 过境时间为 1:45pm, 计划发射时间在 2021 年之后, 在轨运行时间大于 3 年。这是一个多平台多传感器任务^[27], 在现有 Cloudsat 和 CALIPSO 卫星任务对地观测经验的基础上, 加入了新的设计, 通过微波波段、红外波段、可见光波段和紫外波段获取云和气溶胶参数的垂直分布, 以及海洋生态的全球观测。ACE 任务包括两台主动载荷——高光谱分辨率雷达 ACE/Lidar (Aerosol Cloud Ecosystems Lidar)、双波长多普勒云雷达 CPR (Cloud Profiling Radar for CloudSat) 和两台被动载荷——多角度偏振成像仪 (Polarimeters) 和海上色探测仪 OCI (Ocean Color Instrument)。

为满足气溶胶、云和海洋观测的科学需求, ACE 任务最终采用具有单光束、多波长、高光谱分辨率的激光雷达, 具有三个后向散射通道 (1064nm, 532nm 和 355nm), 两个消光通道 (532nm 和 355nm) 和两个偏振通道 (532nm 和 355nm)。结合三个后向散射和两个消光波长可独立反演气溶胶光学特性 (散射和吸收) 和微物理特性 (尺度、折射指数和浓度) 的垂直分布特征^[28]。在气溶胶类型的判别上, 相比利用后向散射和消光通道的结合, 偏振通道具有更强的分辨能力^[29-31]。另外, 结合 Ka/W 双频段双偏振多普勒云雷达^[32]和多角度偏振成像仪, ACE 任务可以观测更丰富的气溶胶和云信息, 因此, ACE 任务相比 EarthCARE 任务又有了新的增量, 可以进一步揭示气溶胶、云和降水之间的复杂关系, ACE/Lidar 和 ACE/CPR 指标设置如表 8 所示。

5.3 中国的计划和进展

针对未来气象气候及大气环境监测的需求, 我国北京遥测技术研究所正在进行星载微波激光复合探测雷达的研制工作。这台复合雷达不仅可以像 EarthCARE 和 ACE 任务一样实现激光、微波雷达的共平台搭载, 另外还具有共口径一体化的设计, 这有利于微波雷达和激光雷达对云和气溶胶的高度时间匹配、空间匹配的联合遥感, 通过数据处理和联合反演, 可以获得更加精确的云和气溶胶信息, 为未来星载微波-激光雷达复合探测全球云-气溶胶垂直分布及宏观微观特征奠定基础。

表 7 EarthCARE/CPR 载荷指标

Table 7 The specifications for EarthCARE/CPR

| 参数 | 指标 |
|--------|------------------|
| 中心频率 | 94.05GHz |
| 脉冲宽度 | 3.3μs |
| 极化 | 圆极化 |
| 发射功率 | >1.5kW |
| 高度范围 | 12km, 16km, 20km |
| 垂直分辨率 | 500m (100m 采样) |
| 水平分辨率 | 750m |
| 最小灵敏度 | -35dBz |
| 辐射准确度 | <2.7dB |
| 脉冲重复频率 | 6100Hz~7500Hz |
| 波束宽度 | 0.095deg |
| 天线尺寸 | 2.5m |
| 指向精度 | <0.015degree |
| 多普勒范围 | ±10m/s |
| 多普勒准确度 | ~1m/s |

表 8 ACE/Lidar 和 ACE/CPR 指标

Table 8 The specifications for ACE/Lidar and ACE/CPR

| 参数 | 指标 |
|----------------|-----------------------------|
| ACE/Lidar 工作波长 | 355nm 532nm 1064nm |
| ACE/CPR 工作频段 | 94.05/35GHz |
| ACE/CPR 灵敏度 | -30dBz |
| ACE/CPR 采样技术 | 沿轨方向 2km 采样间隔 |
| ACE/CPR 水平分辨率 | 1.4km (跨轨) x 3.5km (沿轨); |
| ACE/CPR 垂直分辨率 | 500m |
| ACE/CPR 全球覆盖时间 | 16 天 |

我国正在研制的复合雷达的两个载荷是微波测云雷达和激光雷达。云雷达采用94.05GHz的毫米波雷达探测厚云和云内粒子的信息。激光雷达的探测波长覆盖了紫外波段、可见光波段和近红外波段，具有偏振探测能力和高光谱分辨率特性，同时具有较高的信噪比，目标是定量获取云-气溶胶的多参数信息。主要技术指标设计如表9所示。

5.4 产品设计

星载雷达探测技术可以实现全球尺度，全天候的云和气溶胶的主动定量探测。高分辨率的激光雷达主要观测云和气溶胶以及边界层特性，可以有效地观测到沙尘、烟雾、火山灰，并对气溶胶进行分类，还可以观测到复杂的云层结构。激光雷达直接获得的大气消光系数、后向散射系数信息，结合多波长探测的设计，更有助于获取高精度的云和气溶胶谱分布等微物理参数。星载微波云雷达在冰云等微弱目标探测方面具有明显优势，双频云雷达可以进一步实现对不同尺度云粒子的探测，可以提高天气和气候模式的准确性。星载激光雷达和云雷达可获得的云和气溶胶产品如表10所示。

6 结语和展望

本文详细介绍了云和气溶胶探测的科学需求，天气预报模式和气候模式对星载遥感仪器探测参数的定量需求以及云和气溶胶联合观测需求。针对应用需求，进一步阐述了国外微波激光联合探测、我国微波激光复合探测星载仪器的发展现状及载荷的主要技术指标和产品设计。

目前，在轨运行的云和气溶胶主动探测仪器有CALIPSO/CALIOP和Cloudsat/CPR。相比被动卫星遥感，独立的主动星载探测仪器已获取了更多的云和气溶胶参数信息，但随着模式应用的不断发展，对卫星观测数据的产品和精度提出了更高的要求。面对越来越迫切的气象气候及大气环境监测的需求，发展多波长、高光谱分辨

表9 中国的激光-微波复合探测雷达主要技术指标
Table 9 The major specifications for Chinese multiplex microwave and laser radar

| 仪器 | 参数 | 指标设计 |
|------|-----------|---------------------------------------|
| 激光雷达 | 探测范围 | 0~20km |
| | 工作波长 | 激光: 355nm (偏振), 532nm (偏振), 1064nm |
| | 激光发散角 | 100urad |
| | 地面足印直径 | 41m |
| | 重复频率 | 20Hz |
| | 足印间距 | 350m |
| | 垂直分辨率 | 100m@米通道, 300m@瑞利通道 |
| | 轨道高度 | 407km |
| 微波雷达 | 工作频段 | 94.05GHz±30MHz |
| | 微波雷达重频 | ≤4725Hz |
| | 星下波束宽度 | 0.095° |
| | 微波最小探测灵敏度 | -35dBz |
| | 垂直分辨率 | 500m |
| | 轨道高度 | 407km |

表10 星载激光雷达和云雷达产品设计
Table 10 Product design for spaceborne lidar and cloud radar

| 仪器 | 云产品 | 气溶胶产品 | 降水产品 |
|---------|------------|----------|--------|
| 星载激光雷达 | 云光学厚度 | 气溶胶光学厚度 | |
| | 云顶高度 | 气溶胶浓度 | |
| | 边界层顶高度 | 气溶胶有效半径 | |
| | 对流层顶高度 | 气溶胶质量混合比 | |
| | 云滴有效半径 | 气溶胶类型 | |
| | 云冰 | 气溶胶火山灰 | |
| | 云冰总量 | 气溶胶火山灰总量 | |
| | 云冰有效半径 | | |
| | 云液态水 (CLW) | | |
| | 云液态水总量 | | |
| | 云内冻结高度 | | |
| | 云内融化层厚度 | | |
| | 极区平流层云 | | |
| | 星载云雷达 | 云底高度 | |
| 云滴有效半径 | | | 地表降水强度 |
| 云冰 | | | |
| 云冰总量 | | | |
| 云冰有效半径 | | | |
| 云中液态水 | | | |
| 云中液态水总量 | | | |
| 云顶高度 | | | |
| 云中冰冻层高度 | | | |
| 云内融化层厚度 | | | |

率的星载激光雷达和高灵敏度、双频乃至多频段的星载微波雷达, 通过同平台、同视场观测改善时空匹配精度, 获取高精度的云和气溶胶参数, 对提高数值天气预报的准确性和气候预测模式的发展具有重要推动作用。

参考文献

- [1] LEE K H. Vertical profiling of aerosol optical properties from LIDAR remote sensing, surface visibility, and columnar extinction measurements[M]. 2018.
- [2] 宋长波, 赵一鸣. 星载云、气溶胶遥感雷达技术现状与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2017, 38(6): 10–16.
SONG Changbo, ZHAO Yiming. Development status and direction of spaceborne lidar and radar for cloud and aerosol remote sensing[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(6): 10–16.
- [3] KALBERER M. Aerosols: Aerosol Physics and Chemistry[M]. Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 2015.
- [4] HAYWOOD J. Chapter 27—atmospheric aerosols and their role in climate change[J]. Climate Change, 2016: 449–463.
- [5] 陈洪滨, 范学花, 夏祥鳌. 大气气溶胶的卫星遥感及其在气候和环境研究中的应用[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 621–633.
CHEN Hongbing, FAN Xuehua, XIA Xiangao. Review of satellite remote sensing of atmospheric aerosols and its applications in climate and environment studies[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(3): 621–633.
- [6] 郑建宇, 刘东, 王志恩, 等. CloudSat/CALIPSO 卫星资料分析云的全球分布及其季节变化特征[J]. 气象学报, 2018, 76(3): 420–433.
ZHENG Jianyu, LIU Dong, WANG Zhien, et al. Global distribution and seasonal variation of clouds observed from CloudSat/CALIPSO[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(3): 420–433.
- [7] LEFEBVRE A, AMAUD H, ABERLARDO P A, et al. EarthCARE mission, overview, implementation approach, and development status[C]//Spie Asia-pacific Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [8] LOHMANN U, FEICHTER J. Global indirect aerosol effects: a review[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2004, 5(3): 715–737.
- [9] LEE S S, LI Z, MOK J, et al. Interactions between aerosol absorption, thermodynamics, dynamics, and microphysics and their impacts on a multiple-cloud system[J]. Climate Dynamics, 2017, 49(11-12): 3905–3921.
- [10] 张仕鹏. 全球模式基于动力学背景分型的气溶胶间接效应特征分析[D]. 南京: 南京大学, 2017.
ZHANG Shipeng. On the characteristics of aerosol indirect effect based on dynamic regimes in global climate models[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [11] FENG X, GERARD V H, DINER D J, et al. Coupled retrieval of liquid water cloud and above-cloud aerosol properties using the airborne multiangle spectro polarimetric imager (AirMSPI)[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2018, 123(6): 3175–3204.
- [12] 马晓燕, YU F Q, QUAAS J 等. 数值模拟结合卫星资料研究气溶胶气候效应[C]//第十三届全国气溶胶会议, 2017.
MA Xiaoyan, YU F Q, QUAAS J, et al. Study on aerosol climate effects using numerical simulation and satellite data[C]//The 13th national conference for aerosol science and technology, 2017.
- [13] 吕巧谊, 张玉轩, 李积明. 南半球中高纬度区域不同类型云的辐射特性[J]. 气象学报, 2017, 75(4): 596–606.
LV Qiaoyi, ZHANG Yuxuan, LI Jiming. Radiative characteristics of various cloud types over southern mid-high latitudes[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(4): 596–606.
- [14] ANDERSSON E. Statement of guidance for global numerical weather prediction(NWP)[EB/OL].[2018-5-11].<https://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/SOG/SoG-Global-NWP.pdf>.
- [15] EYRE J. Requirements for observational data: The rolling review of requirements[EB/OL].[2014-07-04].https://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/article_bulletin/related_docs/RRR-process.pdf?Am6z0jN8LkwlaUXBIzdztWzd7eqCetb2.
- [16] LEE S S, LI Z, ZHANG Y, et al. Effects of model resolution and parameterizations on the simulations of clouds, precipitation, and their interactions with aerosols[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2017, 18(1): 1–56.
- [17] 王富. 中国东部地区气溶胶—云相互作用卫星遥感建模研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

- WANG Fu. Analysis of aerosol-cloud interaction observed from spaceborne sensors over eastern China[D]. Chengdu: University of electronic science and technology of China, 2015.
- [18] COSTANTINO L, BREON F M. Analysis of aerosol-cloud interaction from multi-sensor satellite observations[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(11): 1–5.
- [19] NICHOLAS M, ATHANASIOS N. Effects of ocean ecosystem on marine aerosol-cloud interaction[J]. Advances in Meteorology, 2010: 1687–9309.
- [20] KAUFMAN Y J, KOREN I, REMER L A, et al. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(32): 11207–11212.
- [21] BULGIN C E, PALMER P I, THOMAS G E, et al. Regional and seasonal variations of the Twomey indirect effect as observed by the ATSR-2 satellite instrument[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35.
- [22] 王文彩. 利用 A-Train 卫星资料研究 PACDEX 实验期间源区和沉降区沙尘云的微物理及辐射特性[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- WANG Wencai. Dusty cloud properties and radiative forcing over dust source and downwind regions derived from A-Train data during PACDEX[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
- [23] MACE G, BEHRENFELD M, HOSTETLER C, et al. A next generation earth science satellite constellation opportunity to advance aerosol, cloud, precipitation and ocean ecosystem science[EB/OL]. White Paper Submitted to the Second RFI by the 2017 Decadal Survey Panel. Available on-line from: <https://acemission.gsfc.nasa.gov/whitepapers.html>.
- [24] KHAIN A P, BENMOSHE N, POKROVSKY A. Factors determining the impact of aerosols on surface precipitation from clouds: an attempt at classification[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2008, 65(6): 1721–1748.
- [25] KORE P A. Variability and trends in low cloud cover over India during 1961-2010[J]. Mausam, 2017, 68(2): 235–252.
- [26] LEFEBVRE A, HELIERE A, WALLACE K, et al. The ESA EarthCARE mission development status[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2017.
- [27] STARR D O. NASA's aerosol cloud ecosystems (ACE) mission science goals and implementation[C]. The 13th Conference on Atmospheric Radiation and the 13th Conference on Cloud Physics. Multi-Instrument/Platform Remote sensing of clouds, 2010.
- [28] SAWAMURA P, MOORE R, BURTON S P, et al. HSRL-2 aerosol optical measurements and microphysical retrievals vs. airborne in situ measurements during DISCOVER-AQ 2013: an intercomparison study[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(11): 7229–7243.
- [29] BURTON S P, VAUGHAN M A, FERRARE R A, et al. Separating mixtures of aerosol types in airborne high spectral resolution lidar data[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 7(2): 419–436.
- [30] DUBOVIK O, LI Z, MISHCHENKO M I, et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: instruments, methodologies, results, and perspectives[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2019: 474–511.
- [31] PAPAGIANNOPOULOS N, MONA L, AMODEO A, et al. An automatic observation-based aerosol typing method for EARLINET[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(21): 15879–15901.
- [32] STARR D O. NASA's aerosol-cloud-ecosystems (ACE) mission[C]. Imaging and Applied Optics, OSA Technical Digest, Optical Society of America, 2011.

[作者简介]

王倩 1989年生, 博士在读, 助理研究员, 主要研究方向为卫星大气遥感。

毕研盟 1979年生, 通讯作者, 博士, 研究员, 主要研究方向为卫星大气遥感。

刘成保 1986年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为遥感数据预处理地理定位。

杨忠东 1964年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为卫星大气遥感。