



通过优化卫星成像仪光谱通道设置提升全球云特性探测能力

刘超¹, 滕诗文^{2*}

1. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 气候系统预测与变化应对国家重点实验室, 南京 210044

2. 中国海洋大学海洋与大气学院海洋气象学系, 海洋动力-物理环境与智能感知全国重点实验室, 青岛 266100

* 通讯作者, E-mail: tengshiwen@ouc.edu.cn

2026-01-11收稿, 2026-04-21修回, 2026-05-22接受, 2026-07-15网络版发表

国家重点研发计划项目(2024YFF0811300)、国家自然科学基金项目(U2442215、42305073)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(202313021)资助

摘要 云的准确探测和认识对天气预报和气候研究至关重要, 但其在垂直方向上分布特征的不均匀给依赖单层、均匀云层假设的卫星被动遥感云特性带来了巨大挑战。本文提出可以通过优化卫星短波红外通道设置, 特别是联合使用1.6、2.13和2.25 μm 等多个云特性敏感波段, 以改进对云垂直分布特征的探测能力。多短波红外观测利用固态和液态云粒子吸收特性的差异, 实现对重叠云(如冰层在水层之上)的识别, 并更加准确地获取重叠云的云高、光学和微物理等关键参数。最新研究证实, 这种光谱组合显著降低了云特性反演误差, 并进一步改善了云辐射效应估计。因此, 我们建议在单个星载光谱成像仪中集成至少四个短波红外通道(云吸收能力有显著差异)以实现更准确的云特性反演。与此同时, 推进发展协同反演算法以及物理人工智能技术是将这些光谱观测能力转化为准确的云特性的关键, 并最终增强我们对云及其气候效应的理解。

1 引言

云覆盖了地球表面三分之二以上区域, 并通过反射太阳辐射、吸收和发射长波辐射来调节地球的能量平衡(Baker和Peter, 2008)。云影响着降水的形成和分布, 对水资源和陆地生命至关重要, 其形成过程中释放的潜热也是大气环流的关键驱动因素(Bony等, 2004)。Slingo(1990)定量地描述了云对地球能量收支影响的重要性: 当云液态水路径增加约20%, 或云顶高度增加约600 m, 或云滴有效半径变化约2 μm , 所引起的辐射效应就相当于二氧化碳浓度加倍所产生的辐射强迫。因此, 准确探测和理解云对提高天气预报的准确性、量化云辐射效应和云-气候反馈作用等都至关重要。

长期且稳定的卫星遥感观测为监测云的宏观和微观特性提供了不可或缺的数据, 这对诊断气候变化机制、发布水文气象预警以及评估人类活动的影响至关重要。卫星主动遥感能够获取大气垂直廓线信息, 数十年来累积了大量关于云和气溶胶垂直结构的探测数据, 在探测云的三维结构方面具有不可替代的优势。其中, 云雷达对较厚云层及多层云穿透能力强, 激光雷

达则对薄云和气溶胶具有高敏感性。然而, 受采样覆盖范围和观测频次的限制, 主动遥感难以实现大范围空间覆盖和对特定区域或天气系统的连续跟踪。相比之下, 卫星被动遥感提供了连续、大范围的云观测, 使其成为当前云特性探测的主要工具。光谱成像仪是卫星对地球和大气观测中最核心的载荷之一, 可以利用高精度、多光谱的观测实现对云的宏观、光学、微物理等特性的准确反演。国际卫星云气候计划(ISCCP)于1982年作为世界气候研究计划的一部分成立, 通过整合地球静止轨道和极地轨道卫星的可见光和红外辐射观测, 建立了首个长期、全球性的云特性气候数据集(Rossow和Schiffer, 1999)。这一数据集不断更新发展, 被广泛用于研究云的全球分布和变化(包括云量、云类型和云特性等)和评估云对地球能量收支和气候变化的影响。此外, ISCCP数据集也是评估再分析资料和耦合模式比较计划(CMIP)中云模拟性能的重要基准(Tselioudis等, 2021)。

然而, 由于被动光谱成像仪获取的是整层大气积分辐射, 从中解析云的垂直信息极具挑战性。自Nakajima和King(1990)提出利用卫星双光谱通道反演云光学厚度(COT)和有效粒子半径(CER)的算法以来, 该方法已经成为卫星云探测的经典方案, 被

中文引用格式: 刘超, 滕诗文. 2026. 通过优化卫星成像仪光谱通道设置提升全球云特性探测能力. 中国科学: 地球科学, 56(8): 3210–3213, doi: 10.1360/SSTe-2026-0018
英文引用格式: Liu C, Teng S. 2026. Enhancing global cloud property retrieval capabilities by optimizing satellite spectral channels. Science China Earth Sciences, 69(8): 3162–3166, <https://doi.org/10.1007/s11430-026-1971-7>

当前大多数卫星云特性业务产品采纳。该算法依赖一个理想的基础假设，即观测像素内的云是单层、均匀的且具有单一相态。然而，真实大气中云在垂直方向上是高度不均匀的，超过20%的云具有多层重叠结构，在热带和高纬度洋面上的发生频率可达40%以上(Yuan和Oreopoulos, 2013)。因此，当高层云覆盖在低层云之上时，此类重叠云结构很容易被误判为中层单层云，从而导致反演的云特性以及后续云辐射效应估算出现不可避免的偏差。

鉴于云垂直不均匀性广泛存在及其对云特性反演的重要影响，学者们投入了大量努力，致力于通过多源观测融合和新算法的提出以更好地探测和反演云特性(Huang等, 2005, 2006; Sourdeval等, 2015)。与此同时，新一代卫星光谱成像仪发展中一个微小但重要的通道调整引起了关注。具体而言，经典的MODIS(Platnick等, 2017)载荷上中心波长为2.13 μm 的短波红外(SWIR)通道在VIIRS载荷(Lee等, 2006)中被微调至2.25 μm 。我们发现固态冰晶粒子和液态水滴粒子在不同短波红外波段(1.6和2.25 μm)具备显著不同的吸收和反射特性，为“分离”云的垂直结构提供了可能。因此，我们认为将更多且对云特性敏感的短波红外通道纳入下一代被动光谱成像仪的设计中，将有效增强其对云三维特性的观测能力，并最终加深对云在调节地球能量平衡中作用的认识。

2 短波红外观测有助于云垂直分布特征的探测

早期研究证实短波红外观测受云粒子辐射衰减减弱的影响显著，3.9 μm 波段对云顶部信息高度敏感，而1.6 μm 、2.1 μm 等波段可探测到云内更深层(Platnick, 2000)。Chang和Li(2002, 2003)组合利用1.25、1.6、2.1和3.7 μm 多个短波红外通道，提出了低层层状水云有效粒子半径垂直廓线的反演方案。King和Vaughan(2012)将这一概念在短波红外高光谱观测中进行了拓展应用，指出高光谱测量可以进一步提高海洋层积云的液滴廓线反演精度。近年来研究焦点已从理想的单一相态识别扩展到云垂直结构中多相态粒子的识别。通过结合1.6和2.25 μm 通道的观测，可以识别液态云层下方的冰相或混合相态云层(Miller等, 2014)。Miller等(2014)还指出，联合使用2.13和2.25 μm 通道在云相态识别中比单独使用其中任一通道能提供更具辨别力的信息，这一结论也得到了Coddington等(2017)的认可。此后，类似的短波红外光谱通道组合被应用于识别具有冰-水重叠结构的多层云(Wang等, 2019, 2024; Sun-Mack等, 2024)以及过冷水云(即混合相态云)(Zhou等, 2022)。以最典型的双层重叠云为例，即上层为较薄的冰云，下层为液态水云(图1)，这类双层云在重叠云系统中所占比例超过50%。不同相态云对不同短波红外通道的响应(吸收和反射)存在显著差异，使得各通道可以提供独特的光谱信息。具体而言，由于固态冰晶粒子和液态水滴粒子对2.13 μm 波段附近入射太阳辐射的吸收强于对1.6和2.25 μm 波段辐射的吸收，因此相同条件下，卫星在2.13 μm 波段探测到的云反射率最弱，而1.6和2.25 μm 通道观测反射率的相对强度取决于云中的固态-液态粒子含量比(图2A)。此外，固态和液态云粒子在1.6和2.25 μm 光谱区间的吸收强弱特征呈相反趋势，这为不同相态云的特征分离提供了物理基础。这一差异

可从反射率中被直接观测到，并作为云热力学相态识别的主要参考(图2B)。对于单层水云，2.25和2.13 μm 通道的反射率比值接近1，因为两个波段对液态云粒子的吸收特征相似。但当上层存在冰相云粒子时，反射率比值会随着上层冰云COT的增加而显著增加。对于2.25和1.6 μm 的反射率差值，单层水云显示出负差异，而随着上层冰云COT的增加，这种差异逐渐从负值变为正值。这些清晰的差异特征有助于分离不同相态云的信息，从而提高对垂直云结构的探测能力。

这一发现促使我们思考：优化卫星光谱成像仪短波红外通道配置是否能进一步提高对云光学和微物理特性垂直分布特征的探测和理解？Teng等(2020)系统地分析了四个短波红外通道组合(0.87、1.6、2.13和2.25 μm)对上冰-下水结构云特性的探测敏感性，并利用VIIRS的0.87、1.6和2.25 μm 通道和MODIS的2.13 μm 通道观测数据进行了重叠云光学和微物理特性的反演试验。结果表明，以上四个短波红外观测与先进反演算法的结合，可以有效反演出上层冰云(多为半透明卷云)和下层水云的云光学厚度和有效粒子半径，在具代表性的普遍场景(上层冰云的COT小于约7且下层水云的COT大于5)中有较强的表现，能够显著降低传统方法在云层重叠情况下对薄卷云COT的高估。通过结合对云顶高度敏感的长波红外观测信息，可以有效获取中低云上覆盖半透明卷云的垂直结构，将基于单层假设得到的云顶高度的反演平均偏差降低约1.5 km(Teng等, 2023)。与卫星主动遥感相比，上层薄卷云和下层水云云顶高度的平均偏差被限制在-1.36 km和-1.21 km，显著改善了传统方法对薄卷云云顶高度的低估和对中低层水云云顶高度的高估。此外，通过将这些准确的云顶高度与动态云水含量特征相结合，可以有效推导出云底高度，从而提供更全面的云垂直结构(Tan等, 2023)。Hu等(2025)进一步通过数值模拟验证了多个短波红外通道观测对混合相态云特性的敏感性。而在反射通道不再适用的夜间，3.9 μm 波段展现出了反演夜间云特性的优势。Minnis等(2019)基于3.9 μm 和多个长波红外波段观测，结合神经网络算法实现了全天候重叠云探测及其上层云物理特性反演。尽管该方法云顶(云底)高度反演精度达到 $\pm 1.2(1.6)$ km，白天(夜间)光学厚度的反演不确定性为 $\pm 0.457(0.556)$ ，但其定量反演能力局限于上层云特性，无法反演下层水云的微物理特性。这些研究结果都有力地证明了被动光谱成像仪在探测云三维结构方面的潜力。

基于传统单层云假设会过度简化云结构并引入云特性反演偏差这一共识，更好地表征云的垂直结构和热力学特性对改善云辐射效应的估算具有关键意义。研究表明，云的分层垂直结构对大气层顶纬向平均长波和短波辐射通量能够产生 10 W m^{-2} 以上的影响(Li等, 2011)，其年平均辐射效应更是占总云辐射效应的约45%(L'Ecuyer等, 2019)。因此，这些新的观测见解对评估云的辐射效应具有深远意义，也为在模式中更好地表征云重叠特征提供更丰富的观测证据。尽管反演得到的垂直结构无法严格重现真实状态，但多光谱信息带来的特性表征提高对优化传统单层云假设下的辐射效应估计仍具重要性。然而，目前受限于多源载荷联合(单一载荷无法满足通道需求)、多层云辐射传输模拟和定量反演困难等问题，相关研究仍然相对有限，

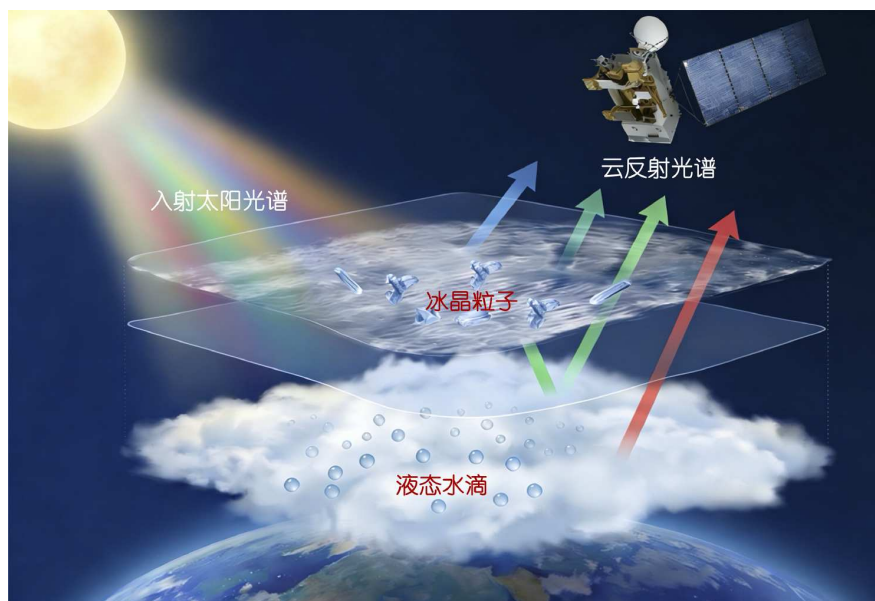


图1 (网络版彩图)具有垂直不均匀性的云的卫星遥感示意图。图中展示了典型的双层重叠云,较薄的冰云覆盖在液态水云之上

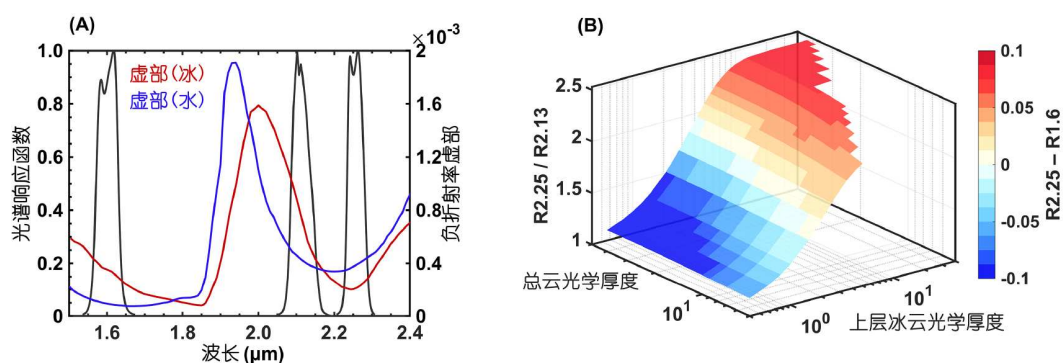


图2 (网络版彩图)多个短波红外通道对典型重叠云的敏感性示意图。(A) 1.6、2.13和2.25 μm 短波红外通道的光谱响应函数(左y轴)以及冰(红色实线)和液态水(蓝色实线)的复折射率虚部随波长的变化(右y轴)。(B) 2.25和2.13 μm 通道反射率比值(z轴)以及2.25和1.6 μm 通道反射率差值(颜色映射),随上层冰云光学厚度(x轴)和云层总光学厚度(y轴)的变化函数

系统性研究尚显薄弱,对云垂直结构辐射效应的定量认识仍存在较大不确定性,未来亟待通过发展综合观测网络、优化反演算法、结合人工智能等方式逐步实现突破。

目前已有基于光谱成像仪和红外高光谱探测仪联合反演全天候云微物理特性方面的研究,将成像仪的高时空分辨率和高光谱仪器更加细致的光谱云特性信息融合,在强对流云系统监测中展现出明显优势(Li等, 2005)。Xia等(2025)最新研究指出通过结合高光谱红外仪器和高分辨率成像仪,可以显著增强夜间云光学和微物理特性的反演能力,反演精度相比传统方法提高了约10%,同时人工智能的引入使得云反演过程保持了很强的昼夜连续性。这些进展进一步凸显了多源观测联合对云特性探测的必要性。

3 展望未来

综上,当前研究已经验证了多个对云特性敏感的短波红外

通道组合在增强云垂直分布特征探测能力方面的进步和优势。建立长期稳定的多短波红外通道观测可以为未来云特性及其辐射效应的系统性研究提供关键数据,同时也有助于加深我们对云的理解。

然而,现有在轨光谱成像仪的通道配置多基于传统通道设计经验,且仅配备了部分上述短波红外通道,相关研究受限于既有框架,主要依赖融合不同平台多传感器的有限观测数据(Teng等, 2023)。例如,MODIS/Aqua和VIIRS/SNPP均位于太阳同步轨道上,尽管二者可凭借超过2,300 km的超宽幅宽实现对同一区域的准同步双观测,但其轨道重叠仅每2-3天发生一次。据统计,两颗卫星每天准同步观测的区域覆盖了地球表面约30%–40%。如果能够将多个短波红外通道集成到单一传感器中,观测覆盖将大大扩展。

基于上述讨论,我们提出,在未来卫星光谱成像仪载荷中至少同时配置四个对云特性有不同敏感性的短波红外通道

(0.87、1.6、2.13和2.25 μm)，以更好地推进云特性的探测能力。特别值得注意的是，美国国家航天航空局(NASA)在其PACE卫星上搭载的海洋水色仪(OCI)(Werdell等, 2019)已包含了1.6、2.13和2.25 μm 这三个短波红外通道，旨在海色遥感时更好地考虑冰云和水云的影响。Coddington等(2017)通过试验研究已证实这样的通道配置相比独立使用2.13或2.25 μm 通道可以将冰云(水云)相态反演概率从65%(63%)显著提高至82%(70%)。然而，针对多层云场景的应用评估以及更多新通道组合的潜力挖掘，仍有待系统开展。

此外，未来研究应进一步跳出既有仪器通道选择的框架约束，面向新的科学需求，探索更具物理辨别力的敏感波段组合。深入挖掘不同通道之间更本质的协同关系、约束关系与信息互补机制，以构建最优的光谱观测配置。同时，发展先进的反演算法，将新颖的光谱观测有效转化为准确的大气参数。希望我国风云系列气象卫星在下一代传感器的通道设计中，通过前瞻性的通道配置与协同反演框架，提升对云特性及其辐射效应的探测与认识水平。

致谢 文中涉及的数值模拟工作在南京信息工程大学高性能计算中心完成。

参考文献

- Baker M B, Peter T. 2008. Small-scale cloud processes and climate. *Nature*, 451: 299–300
- Bony S, Dufresne J L, Le Treut H, et al. 2004. On dynamic and thermodynamic components of cloud changes. *Clim Dyn*, 22: 71–86
- Chang F L, Li Z. 2002. Estimating the vertical variation of cloud droplet effective radius using multispectral near-infrared satellite measurements. *J Geophys Res-Atmos*, 107: D15
- Chang F L, Li Z. 2003. Retrieving vertical profiles of water-cloud droplet effective radius: Algorithm modification and preliminary application. *J Geophys Res*, 108: 2003JD003906
- Coddington O M, Vukicevic T, Schmidt K S, et al. 2017. Characterizing the information content of cloud thermodynamic phase retrievals from the notional PACE OCI shortwave reflectance measurements. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 8079–8100
- Hu L, Yao B, Teng S, et al. 2025. Visible and shortwave-infrared spectral characteristics of mixed-phase clouds in typical satellite radiometer channels. *Atmos Ocean Sci Lett*, 18: 100588
- Huang J, Minnis P, Lin B, et al. 2005. Advanced retrievals of multilayered cloud properties using multispectral measurements. *J Geophys Res*, 110: 2004JD005101
- Huang J, Minnis P, Lin B, et al. 2006. Determination of ice water path in ice-over-water cloud systems using combined MODIS and AMSR-E measurements. *Geophys Res Lett*, 33: 2006GL027038
- King N J, Vaughan G. 2012. Using passive remote sensing to retrieve the vertical variation of cloud droplet size in marine stratocumulus: An assessment of information content and the potential for improved retrievals from hyperspectral measurements. *J Geophys Res*, 117: 2012JD017896
- Li J, Huang H L, Liu C Y, et al. 2005. Retrieval of cloud microphysical properties from MODIS and AIRS. *J Appl Meteorol*, 44: 1526–1543
- Li J, Yi Y, Minnis P, et al. 2011. Radiative effect differences between multilayered and single-layer clouds derived from CERES, CALIPSO, and CloudSat data. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 112: 361–375
- Lee T E, Miller S D, Turk F J, et al. 2006. The NPOESS VIIRS day/night visible sensor. *Bull Amer Meteorol Soc*, 87: 191–200
- L'Ecuyer T S, Hang Y, Matus A V, et al. 2019. Reassessing the effect of cloud type on Earth's energy balance in the age of active spaceborne observations. Part I: Top of atmosphere and surface. *J Clim*, 32: 6197–6217
- Miller S D, Noh Y J, Heidinger A K. 2014. Liquid-top mixed-phase cloud detection from shortwave-infrared satellite radiometer observations: A physical basis. *J Geophys Res-Atmos*, 119: 8245–8267
- Minnis P, Sun-Mack S, Smith Jr W L, et al. 2019. Advances in neural network detection and retrieval of multilayer clouds for CERES using multispectral satellite data. In: Proc. SPIE Conf. Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIV, Strasbourg, France: Proc. SPIE 11152
- Nakajima T, King M D. 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *J Atmos Sci*, 47: 1878–1893
- Platnick S. 2000. Vertical photon transport in cloud remote sensing problems. *J Geophys Res*, 105: 22919–22935
- Platnick S, Meyer K G, King M D, et al. 2017. The MODIS cloud optical and microphysical products: Collection 6 updates and examples from Terra and Aqua. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 55: 502–525
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP. *Bull Amer Meteorol Soc*, 80: 2261–2287
- Slingo A. 1990. Sensitivity of the Earth's radiation budget to changes in low clouds. *Nature*, 343: 49–51
- Sourdeval O, C-Labonnote L, Baran A J, et al. 2015. A methodology for simultaneous retrieval of ice and liquid water cloud properties. Part I: Information content and case study. *Q J R Meteorol Soc*, 141: 870–882
- Sun-Mack S, Minnis P, Chen Y, et al. 2024. Identification of ice-over-water multilayer clouds using multispectral satellite data in an artificial neural network. *Atmos Meas Tech*, 17: 3323–3346
- Tan Z, Ma S, Liu C, et al. 2023. Retrieving cloud base height from passive radiometer observations via a systematic effective cloud water content table. *Remote Sens Environ*, 294: 113633
- Teng S, Liu C, Zhang Z, et al. 2020. Retrieval of ice-over-water cloud microphysical and optical properties using passive radiometers. *Geophys Res Lett*, 47: e2020GL088941
- Teng S, Liu C, Tan Z, et al. 2023. A multispectral method for retrieving overlapping cloud top heights from passive radiometers. *Remote Sens Environ*, 286: 113425
- Tselioudis G, Rossow W B, Jakob C, et al. 2021. Evaluation of clouds, radiation, and precipitation in CMIP6 Models using global weather states derived from ISCCP-H cloud property data. *J Clim*, 34: 7311–7324
- Wang J, Liu C, Yao B, et al. 2019. A multilayer cloud detection algorithm for the Suomi-NPP Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS). *Remote Sens Environ*, 227: 1–11
- Wang J, Liu C, Yao B, et al. 2024. Multi-layer cloud detection and distributions over the Asia-Pacific region based on geostationary satellite imagers. *J Geophys Res-Atmos*, 129: e2023JD040287
- Werdell P J, Behrenfeld M J, Bontempi P S, et al. 2019. The plankton, aerosol, cloud, ocean ecosystem mission: Status, science, advances. *Bull Amer Meteorol Soc*, 100: 1775–1794
- Xia X, Min M, Li J, et al. 2025. Enhancing nighttime cloud optical and microphysical properties retrieval using combined imager and sounder from geostationary satellite. *EGU sphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2928>
- Yuan T, Oreopoulos L. 2013. On the global character of overlap between low and high clouds. *Geophys Res Lett*, 40: 5320–5326
- Zhou G, Wang J, Yin Y, et al. 2022. Detecting supercooled water clouds using passive radiometer measurements. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL096111

(编委: 李俊)