

(辅助材料)



云遥感、大气辐射和新能源应用遥感产品(CARE2.0) 算法技术档案

CARE 产品主页: https://www.slrss.cn/care_zh/cp/cpgs/

建议引用文献: Letu, H., Shang, H., Ma, R., Shi, C., Nakajima, T. Y., Ishimoto, H., ... & Shi, G. (2026). CARE: A next-generation high resolution cloud and radiation remote sensing product and its Earth system applications. *Science Bulletin*. 71 (7), 1831-1842,

(本材料主要参考 Letu et al., 2026 文献完成)

云遥感、大气辐射和新能源应用遥感产品 (CARE2.0) : 模型、算法及数据应用

胡斯勒图^{1*}, 尚华哲¹, 石崇¹, 马润², 伟乐斯¹, 旭日³, 李明⁴, 姬大彬¹, 孙启翔¹, 苏德毕力格⁵, 王天星⁶, 安妮⁷, 包芳玲¹, 雷永荟¹, 王恒琪¹, 汪文武¹, 许健⁸, 王子明⁹, 包山虎¹⁰, 陈良富¹, 施建成¹, 石广玉¹¹

- 1 中国科学院空天信息创新研究院, 遥感与数字地球全国重点实验室;
- 2 四川轻化工大学, 自动化与信息工程学院;
- 3 内蒙古工业大学, 信息工程学院
- 4 福建理工大学, 智慧海洋科学技术学院
- 5 内蒙古师范大学, 信息中心;
- 6 中山大学, 遥感科学与技术学院;
- 7 包头师范学院, 生态环境学院;
- 8 中国科学院国家空间科学中心, 微波遥感技术重点实验室;
- 9 德国宇航中心大气物理研究所 & 德国美因茨大学大气物理研究所;
- 10 内蒙古师范大学, 地理科学学院;
- 11 中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室;

(*husiletu@radi.ac.cn)

摘要: Cloud Remote Sensing, Atmospheric Radiation and Renewable Energy Application (CARE) 算法体系及其产品目前已涵盖云特性, 气溶胶、大气水汽、地表辐射收支等 30 个参数。该产品主要利用 Himawari-8、FY-4, GOES-R, MSG2 等新一代静止卫星资料, 结合 MODIS、FY-3, POLDER 等极轨卫星资料实现了青藏高原、东亚及全球不同尺度的数据产品生产。CARE 产品最大特色在于其时空分辨率优于现有其他同类产品, 全球产品的空间分辨率 1h、空间分辨率 5km, 能够刻画云水、短波辐射通量等参数的 24 小时时空变化特征。此外, CARE 具有支撑产品研制的全谱段冰晶散射模型、CARE 高性能辐射传输模式和高性能遥感反演算法及近实时监测系统平台。本研究介绍 CARE2.0 模型、算法及产品应用, 主要包括全谱段冰晶散射模型的特色、具备海气耦合、高光谱、偏振特性模拟能力的 CARE 辐射传输模式性能、高性能遥感算法和产品精度评估以及相关数据应用。

1. 前言

云覆盖约占地球表面的 70%，对全球辐射收支和气候变化(King et al., 2013) (云特性的微小变化可能导致辐射特性的显著变化，进而改变全球辐射能量平衡及天气和气候系统(Rosenfeld et al., 2019, Stephens et al., 2012, Zhang et al., 2025)。然而，由于云类型多样且与气溶胶及多种天气系统之间存在复杂相互作用，对云宏观物理特性以及与之密切相关的地表辐射收支参数进行精确量化仍面临较大挑战 (Li et al., 2011, Seinfeld et al., 2016, Ying et al., 2023)。当前的云与辐射收支参数遥感产品仍存在诸多不确定性，其在产品精度、时空分辨率及数据连续性等方面均存在局限，难以有效支撑辐射能量平衡精准估算、气候变化研究及天气和气候模式的改进与优化需求(Letu et al., 2022, Wang et al., 2020a)。

卫星遥感在估算云及地表辐射参数方面具有大范围、周期性覆盖的优势(Seinfeld et al., 2016)。经过近 50 年的发展，国内外学者基于大气辐射传输理论、统计分析、人工智能 (AI) 等方法，已研发出一系列云与辐射参数产品，其中典型的辐射产品包括 ISCCP (Zhang et al., 2004)、GEWEX-SRB (Gupta et al., 1999)、CERES-SSF/SYN (Doelling et al., 2016)、ISCCP-HXG (Tang et al., 2019)、GLASS(Liang et al., 2021)以及 MCD18 (Wang et al., 2020b)等。这些数据产品为全球辐射收支研究提供了重要支撑。然而，受卫星数据时空分辨率、定标精度以及云层干扰等因素的限制，当前大多数产品仍面临精度有限、时空分辨率和时空连续性不足的问题，难以满足云特性和地表辐射收支的精准探测、云参数化方案的改进及中小尺度云的形成发展机理研究需求。此外，部分云特性和地表辐射收支产品，并未同步公开其辐射传输模式或 AI 模型，制约了算法及数据产品的进一步优化和应用。

为深入理解云—辐射—气候变化的相互作用机制，推动天气与气候变化研究及地球系统科学的创新发展，自 2018 年起，Cloud Remote Sensing, Atmospheric Radiation and Renewable Energy Application (CARE) 模型与遥感产品逐步公开，并分别于 2018 年和 2024 年召开了第一届 CARE 学术会议和 CARE 暑期学校。CARE 产品所依托的算法是在 Letu 等人(Letu et al., 2012, Letu et al., 2014, Letu et al., 2016, Letu et al., 2020) 研究基础上持续发展而来。目前，已利用 Himawari-8/9、FY-4、MSG、GOES-R 等静止卫星以及 Aqua、Terra 和 FY-3 等极轨卫星资料，发展了云特性反演算法并生成了相应产品，产品覆盖范围已从东亚扩展至全球，算法参数也从云参数、气溶胶和水汽参数，进一步拓展至地表辐射多分量参数(Letu et al., 2020, Shi et al., 2025)。2022 年 8 月发布了 CARE 遥感产品 1.1 版本 (详见 https://www.slrss.cn/care_zh/)，2025 年进一步发布了全球范围的 CARE 2.0 产品 (Letu et al., 2026)。CARE 产品的主要特点包括：1) 内置大气冰云散射模型与 CARE 辐射传输模式，支撑高精度反演算法开发；2) 构建涵盖云、气溶胶、水汽参数，并扩展至大气顶和地表辐射收支的体系化遥感产品；3) 具有高时空分辨率与可靠的反演精度；4) 多领域应用，不仅涉及遥感数据支撑天气和气候变化研究，其冰晶散射模型与辐射传输模型为地球系统模式的改进等提供了关键支撑。

为促进大气物理学、遥感技术与地球系统科学的融合发展，支持云—辐射—气候变化研究及多学科交叉应用，本文系统介绍了 CARE 算法的构建、产品特点及应用情况，总结了其发展历程、当前存在的不足，并对未来的发展计划进行了展望。

2. CARE 模型、算法和产品

CARE 计划的主要思路是通过构建高性能高精度的大气光学模型，例如冰晶和气溶胶等大气粒子散射模型，将其嵌入到 CARE 辐射传输模式提升模式的模拟性能，应用于天气和气候模式参数化方案的改进。同时，利用发展的 CARE 模型、结合 AI 技术开发高性能卫星遥感反演算法，构建高时空分辨率、高精度的遥感产品，支撑云—辐射—气候变化研究、地球系统科学发展及气象灾害监测等相关研究及多领域应用（图 1）。



图 1 CARE 模型、算法和产品框架

2.1 模型的特色

CARE 模型包括大气光学模型和大气辐射传输模型两部分。其中，大气光学模型包括气体、气溶胶和云的吸收/散射模型。辐射传输模型特色包括海气耦合、矢量辐射传输及高光谱辐射计算等。图 2 显示了 CARE 辐射传输模式框架。

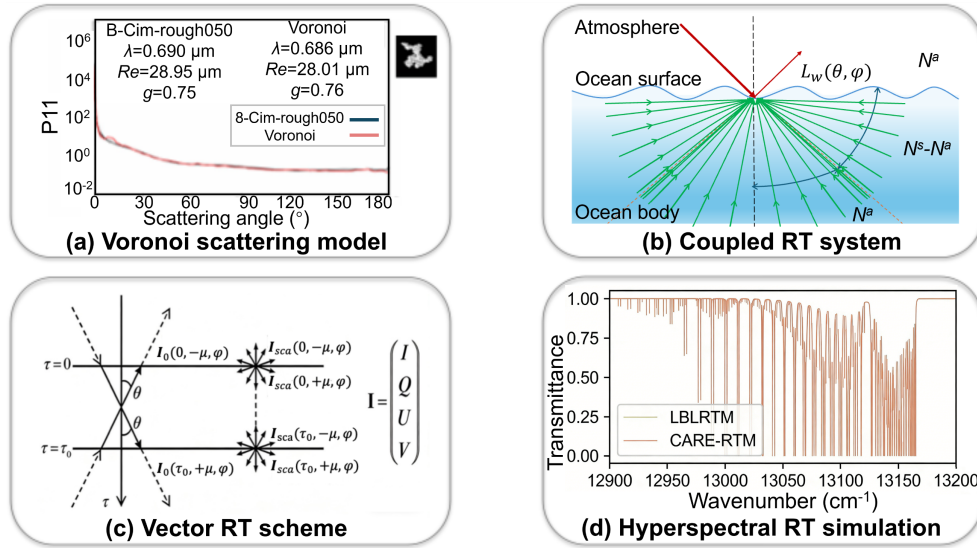


图 2 大气光学模型和辐射传输模式框架及云遥感探测机理

2.1.1 Voronoi 全谱段非规则多边形冰晶散射模型

大气光学模型中，冰云粒子散射模型对冰云辐射特性的模拟不确定性较为显著，导致基于辐射传输模式的自然界冰云的光学和辐射特性模拟误差大，这也很大程度上制约了冰云特性参数辐射特性的模拟及其遥感反演 (Yang and Liou, 1996, Yang et al., 2005)。因此，近年来 CARE 研发团队基于飞机观测冰晶资料开发了非规则形状冰晶粒子散射模型，通过冰晶粒子光学特性参数化方案，将其嵌入到 CARE 辐射传输模型，提高了对冰云光学和辐射特性的遥感反演和模拟能力。Letu 等(2012) (Letu et al., 2012)Ishimoto 等(2012) (Ishimoto et al., 2012)提出了适用于卫星传感器观测通道的最优冰晶散射模型构建方案和冰云微物理参数反演误差评估方法，并发展了基于 FDTD 的非规则冰晶粒子散射特性的数值计算方法。Letu 等 (Letu et al., 2016)基于 FDTD、IGOM、GOM 方法构建了可见光到热红外波段的 plates, columns, droxtals, bullet rosettes 和 Voronoi 等 5 种类型冰晶散射特性数据库，利用 POLDER 卫星反照率数据评估了不同模型对冰云光学特性的模拟能力，并进一步对比国际主流的 4 个冰晶散射模型，得出 Voronoi 模型的冰云模拟能力具有最优的水平。为了更好的支持 Voronoi 散射模型及数据库在不同波段主被动遥感探测及天气和气候模式中的应用，Baran 等 (Baran et al., 2018)、Li 等 (Li et al., 2023)将现有的散射模型从紫外—红外波段扩展到的太赫兹—微波谱段，形成了紫外到微波的全谱段冰晶散射特性模拟能力。

2.1.2 CARE 辐射传输模型

为了更好的支撑高光谱、偏振多角度等不同观测模式的大气探测卫星计划，Shi 等 (2026) (Shi et al., 2026)构建了 CARE 辐射传输模式 (简称“CARE-RTM”)。新构建的 CARE-RTM 模式同时实现了高光谱、海气耦合及偏振信息的辐射传输模拟能力，也是国际上为数不多可以同时满足上述条件的辐射传输模式。该模式基于矢量化的离散纵标及矩阵累加方法，通过创新海气耦合的辐射传输方案、粗糙海面的反射及透射矩阵计算以及考虑不同谱线混合效应的高光谱气体吸收处理等问题，并构建逐线积分计算及相关 k 分布计算方案、基于 Voronoi 的全谱段冰晶散射模型、多成分的气溶胶光学模型及基于源函数的

任意角插值处理模块，实现了高精度的卫星仿真模拟及遥感应应用。通过对比不同波长、不同观测角度、不同海气耦合场景的分析发现，CARE-RTM 模拟的大气顶辐射强度及线偏振度误差在 0.02%及 0.005%；进一步地，为了实现 CARE-RTM 的快速化计算，模式创建了基于 GPU 加速的逐线积分计算程序，提高了高光谱气体吸收的计算效率（提升数百倍）；针对辐射传输的快速计算，模式采用了 CARE 团队前期研发的自适应学习效率调整的神经网络优化模型 Adam_LM (Shi et al., 2021)，通过引入神经网络等 AI 技术，提高了 CARE-RTM 的模拟效率，整体上神经网络的快速辐射传输模拟器单波段计算误差控制在 0.3%以内，单波段计算效率提升数万倍，宽波段计算效率提升数十万倍。

2.2 CARE 遥感反演算法

CARE 遥感反演算法主要基于 CARE 辐射传输模型的查找表方法，并结合深度学习等 AI 技术开发(Shang et al., 2017, Shang et al., 2019, Shao et al., 2023, Zhao et al., 2024)。首先利用多源卫星资料和辅助资料开发云检测算法，进一步发展云相态识别和云顶参数反演算法。利用云相态识别结果、结合卫星多通道观测信息构建云光学厚度、气溶胶光学厚度等大气微物理参数反演算法。进而利用云顶参数和不同相态云微物理反演结果构建云类型、云水含量及云底高度等云宏微观特性参数反演算法，支撑云、气溶胶、水汽、降雨和地表辐射等遥感产品的研制。

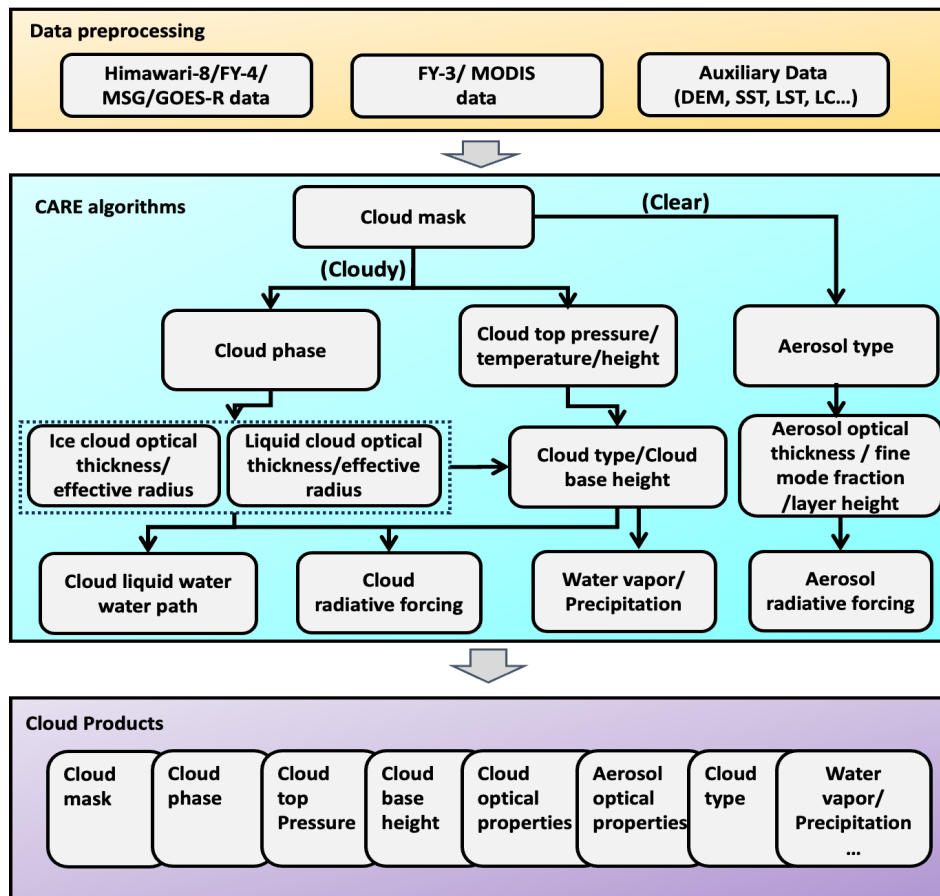


图 3 CARE 云特性遥感反演算法流程

2.2.1 云检测和云相态识别

云检测和云相态识别是云特性遥感反演的前提，算法的误差能够传递到下游的云物理量的反演精度及地表辐射参数的估算精度 (Letu et al., 2014)。CARE 算法基于静止卫星多观测通道和 DEM 高程数据，首先构建了适用于雾霾和冰雪等复杂环境下的白天云检测算法 (Shang et al., 2017)，并揭示了大气污染和冰雪背景影响较大的区域的云量日变化特征 (Shang et al., 2019)；进一步引入了不同相态云，特别是过冷水云的识别模块，该方法通过增加云中过冷水潜在区的判别，并利用云粒子有效半径信息来提高过冷水识别精度 (Wang et al., 2019)，相比传统方法显著改善了混合相态云中过冷水范围的识别效果 (Wang et al., 2024)；Shang 等 (Shang et al., 2024)提出了双层曲面阈值的方法，改进了静止卫星全盘不同光照条件下固定阈值方法适用性差的问题，有效提高了晨昏线以及耀光条件下的云识别精度，在此基础上，以 AHI 全波段的日间云识别算法为真值，结合机器学习模型和红外通道构建了 24h 的云识别和云相态新算法，改进了 CARE 云识别和云相态遥感算法 (An et al., 2023)。基于 CALIPSO 验证表明，CARE 算法的命中率（白天有云条件 76.95%、晴空条件 87.97%，夜间有云条件 73.19%、晴空条件 81.77%）整体优于 MODIS 数据（白天有云条件 77.35%、晴空条件 66.09%，夜间有云条件 78.08%、晴空条件 59.72%），尤其在夜间晴空检测方面优势显著。

2.2.2 云顶高度

云顶参数（云顶高度、温度等）的准确反演对全球辐射收支、能量平衡等具有重要研究意义。Ri 等 (Ri et al., 2021)利用随机森林方法结合 Himawari-8 红外通道数据以及星载激光雷达 CALIPSO/CALIOP 数据实现了高精度的云顶参数反演，并与 MODIS 云顶参数产品进行了比较，证实了算法的有效性。Wei 等 (Wei et al., 2024)针对低云、薄云场景下云顶气压 (CTP) 反演不确定性大的痛点，提出氧气 A 吸收带与偏振波段协同的随机森林算法。该方法以 CALIPSO 激光雷达 CTP 为真值，将带有多角度观测的 763、765nm 通道的氧气 A 吸收带与偏振反射率共同输入模型，充分利用偏振信息对大气分子层厚度的敏感性、O₂ A 带对气压敏感的优势。通过理论模拟与实测数据发现，当云光学厚度 (COT) 大于 10 时偏振信号趋于饱和，通过对 COT 小于 10 的像元单独训练模型，有效抑制了饱和带来的偏差。该框架已应用于 POLDER-3 与国产 GF-5/DPC 数据，较传统 MODIS 及 POLDER 气压产品误差下降约 15%–25%，并成功捕获锋面、海洋层积云等多种场景下的云顶高度变化。

2.2.3 云微物理参数和辐射强迫

云光学厚度、云粒子有效半径等云微物理参数的准确反演对云—气溶胶相互作用、云辐射强迫估算，全球辐射能量平衡研究等均具有重要意义。Letu 等 (Letu et al., 2019)在经典的卫星双通道反演方法 (Nakajima and King, 1990, Nakajima and Nakajima, 1995)基础上，结合 Voronoi 散射模型和 Rstar 辐射传输模型 (Sekiguchi and Nakajima, 2008)构建了不同相态云特性反演算法，成功应用于 Himawari-8 卫星冰云特性反演，并利用 Rstar 模式自带的 Mie 散射模型构建了水云微物理特性反演算法，形成了不同相态云特性的反演能力，相关算法被 JAXA 的 P-tree 系统中的 Himawari-8 云特性反演算法采纳应用。受限于可见光通道的限制，Tana 等 (Tana et al., 2023)以白天云特性反演产品作为真值，基于随机森林方法训练

Himawari-8 红外多通道资料构建了 24 小时云微物理参数反演算法。以云光学厚度、云粒子有效半径等反演结果为输入, 利用辐射传输模式可以进一步计算大气层顶云短波和长波辐射强迫, 从而开展云相关的辐射收支计算。

云辐射强迫的定义为某一给定的有云条件下大气净辐射通量与假设无云时同一大气背景的净辐射通量之差。利用我国 FY-4A 静止卫星, 在反演的云微物理参数基础上开发了大气层顶云短波辐射强迫算法并进行了应用研究。在大气层顶长波辐射强迫方面, Ri 等 (Ri et al., 2024)利用 FY-4A 数据结合极端随机森林方法实现了大气层顶长波辐射强迫的计算。上述长短波辐射强迫算法具有计算效率高、精度高等优点, 可满足地球辐射收支计算等需求。

2.2.4 云类型和云底高度

基于宏观与微观特征参数产品, 云可被划分为多种类型, 其独特的辐射特性是大气动力与热力过程的关键表征, 因此准确的云分类对天气预测、气候变化研究及人工影响天气等诸多领域至关重要。Bao 等 (Bao et al., 2024)在传统 ISCCP 分类算法基础上, 创新性地引入云顶温度作为关键分类参数, 构建了基于云顶温度与光学厚度的二维分类新方法。该方法有效结合了云的微物理属性与热力结构, 成功改善了青藏高原等复杂地形区长期存在的低云严重低估及部分水云被误判为冰云的问题。尤其值得关注的是, 基于 CloudSat 与 CALIPSO 等主动卫星探测数据的综合验证结果, 一致证实了该改进算法在云类型识别精度与分类合理性方面的显著提升, 展现出良好的应用潜力。

此外, Shao 等 (Shao et al., 2023)在云微物理参数反演基础上, 利用 Himawari-8 红外通道数据结合 Cloudsat 获取的高精度云底信息, 实现了云底高度的反演, 并进一步计算了地表下行长波辐射, 通过全球 35 个地基站点数据验证了长波辐射算法的有效性。尽管基于机器学习模型的反演方案取得了较好的精度, 但其反演过程缺乏可解释性和物理基础。为此 Wang 等 (Wang et al., 2025b)利用高光谱 O₄ 波段的观测数据, 提出了有效云水含量作为中间参数, 结合辐射传输模式和机器学习模型, 开发了海洋单层水云的云底高度反演框架。通过 CALIOP 和 CloudSat 联合二级产品的云底高度数据进行验证, 证明了反演算法的有效性。Ji 等 (Ji et al., 2025)利用氧气 A 带信息实现了 POLDER 以及 GF5 卫星的云底压强反演, 该方法评估了多角度氧 A 通道反射率对云底高度的敏感性, 进一步结合智能模型发展了适用全球的云底高度反演算法。

2.2.5 气溶胶

大气气溶胶是悬浮在大气中的液态或固态粒子, 其通过直接和间接效应影响着全球辐射能量平衡及气候变化, 同时对环境和空气质量造成威胁 (Zhao et al., 2024)。影响气溶胶光学特性的参数主要包括: 气溶胶光学厚度 (AOT)、粗细模态比 (FMF)、单次散射反照率 (SSA)、AE 指数等。传统基于暗像元的遥感算法通常采用 2~3 个卫星光谱通道, 可以实现 AOT 的高精度反演, 然而由于其采用的光谱信息有限, 导致反演算法无法提供更多的气溶胶光学特性参数。Shi 等 (Shi et al., 2019)通过融合多像素滑动约束及多波长观测约束, 提高了反演所需的观测信息量, 实现了 AOT 及气溶胶吸收特性的同步反演; 进一步, 受限于最优估计理论计算效率问题, Shi 等 (Shi et al., 2021)构建了一种更高效的深度学习算法, 研发了基于神经网络模型的快速辐射传输前向模型, 开发了气溶胶及海色同

步反演算法 SIRAW, 实现了海洋气溶胶及海洋光学特性的快速同步反演; 面向静止卫星的高频次观测需求, 传统算法由于采用固定的气溶胶类型假设, 难以有效反演 FMF, Tang 等(Tang et al., 2025)提出了一种结合辐射传输与迁移学习方法的全新反演算法, 该算法通过充分考虑不同的气溶胶类型, 通过融合辐射传输模式的模拟数据及近真实场景的观测数据, 基于人工智能技术, 实现了 AOT 及 FMF 的高精度同步反演。相较于传统算法, 新算法 AOT 反演精度提升约 39%, FMF 的反演精度提升约 48%, 可以有效捕捉强沙尘暴和雾霾等污染事件, 此外该算法的计算效率更高, 完全满足在较小计算资源下的静止卫星高频次业务化运行需求。气溶胶层高 (ALH) 是表征气溶胶垂直分布的重要参数, 对定量评估气溶胶辐射强迫和远距离输送具有重要意义。传统的 ALH 获取主要依赖 CALIOP 等激光雷达资料, 但受限于主动遥感技术的空间覆盖。Rao 等 (Rao et al., 2022)提出了一种基于近红外 O₂-A 吸收带、结合辐射传输模式与神经网络技术的反演方法, 并在 TROPOMI 卫星数据上实现了应用, 有效扩展了 ALH 的空间覆盖能力; 进一步 Yao 等(Yao et al., 2026)等通过充分考虑蓝光、O₂-A、O₂B 及短波红外通道, 提出一种 ALH 及 AOT 的同步反演算法, 相较于 TROPOMI 官方产品, ALH 反演精度提升 49%, 能够提供更高精度的气溶胶层高产品, 为研究气溶胶-辐射-气候相互作用提供了新的数据支持。

2.2.6 大气水汽和降水

大气水汽和降水是地球系统能量平衡和水循环过程中的重要参数。星载微波辐射计是获取全天候大气水汽总量的有效手段, 然而目前多数星载微波辐射计尚没有陆地上空的大气水汽总量产品, 其主要原因是微波波段在陆地地表的高发射率影响。Ji 等 (Ji et al., 2017) 通过构建新的陆地地表发射率参数估算方案, 降低复杂陆表对大气水汽反演的干扰, 显著提升了星载微波辐射计在陆地上空的大气水汽总量反演精度, 与 GNSS 站点观测数据相比新算法的大气水汽总量的均方根误差优于 3.45mm。同时首次基于 AMSR-E 和 AMSR2 等星载微波辐射计生成了长时间序列全球、全天候大气水汽总量数据集 (Ji et al., 2021, Ji Dabin, 2022), 为揭示气候变化背景下地球系统的能量收支和水循环过程的变化特征提供数据支撑。Sun 等 (Sun et al., 2024)充分利用微波遥感全天候的优势, 以及红外遥感的高分辨率优势, 提出了一种基于机器学习模型的微波与红外大气水汽总量质量控制和融合方法, 将 0.25°×0.25°的粗分辨率大气水汽总量数据提升至 0.05°×0.05°, 融合后精度分别比原始的 MODIS 和 AMSR2 的大气水汽总量数据提升 19.96%和 27.32%。

降水是水循环过程的重要参数, 特别是实时、高时空分辨率的降雨数据对于极端降水和洪涝灾害预警具有重要的意义。现有静止卫星的降水反演算法多是基于云顶反射率或亮温信息, 很容易受到高层卷云的影响。Ji 等 (Ji et al., 2025)引入云微物理参数 (Tana et al., 2023)中的云光学厚度和云有效粒子半径等信息改进降水识别方法, 显著提升了降水的识别精度, 经小时尺度地面雨量计验证, 新算法在中国及周边地区的降水识别精度比 GSMaP_NOW 提升了 11.43%。

2.2.7 地表辐射通量

地表下行长波和短波辐射是影响地表辐射收支过程的重要参数, 其计算精度不仅受辐射传输模型和相应云和气溶胶等算法可靠性的影响, 还在很大程度上取决于地表反照率、发射率和大气气体吸收等地表参数的准确性 (SHi, 1992, Shi, 1998)。短波辐射受云的影响

较大，针对这一问题，Letu 等 (Letu et al., 2020)和 Ma 等 (Ma et al., 2020)基于 Himawari-8 卫星的不同相态云微物理特性产品，结合 ERA5 温湿廓线资料和气溶胶光学厚度等数据，利用前向辐射传输模型构建了高精度的下行短波辐射反演方法，并通过全球 118 个站点的观测资料验证了算法的精度。此外，结合 Wang 等 (Wang et al., 2018)提出的短波辐射地形校正模型，进一步开发了青藏高原区域考虑地形效应的短波辐射产品。Tana 等 (Tana et al., 2023)提出了基于静止卫星红外多通道的云检测、云微物理及下行短波辐射反演新算法，显著提高了太阳耀斑区短波辐射反演精度。在此基础上，Letu 等 (Letu et al., 2022, Letu et al., 2023)将方法进一步拓展至长波辐射。最终，基于云特性反演产品，融合 Himawari-8、FY-4 等新一代静止卫星数据和 ERA5 资料，实现了全球尺度地表下行短波辐射及相关参数的高精度反演。

2.2 CARE 遥感产品和准实时监测系统

CARE V 1.0 版本于 2018 年开始生产，并公开了亚太地区云量、云光学厚度等部分云特性参数产品。2022 年开始在 CARE 主页上发布了 CARE V 1.1 和 V 1.2 版本的青藏高原和亚太地区云特性及地表辐射通量参数产品 (Li et al., 2020)。V 1.1 版本主要聚焦白天的遥感产品，V 1.2 版本将白天的产品扩展到了 24 小时全天时尺度。2025 年公布了 CARE V 2.0 全球尺度地表辐射通量产品 (图 4)。表 1 显示了目前在主页上公布的主要遥感产品，包括了云、气溶胶、大气水汽、地表和大气顶辐射通量参数产品。不同参数产品的时空分辨率略有不同，今后将继续发布不同区域的特色遥感产品。

为了提高 CARE 模型、算法和产品的应用效率，自 2023 年开始在主页上新增了不同区域云特性、降雨量、地表辐射等参数的准实时监测功能 (<http://www.slrss.cn/care/>) (Letu et al., 2023)。

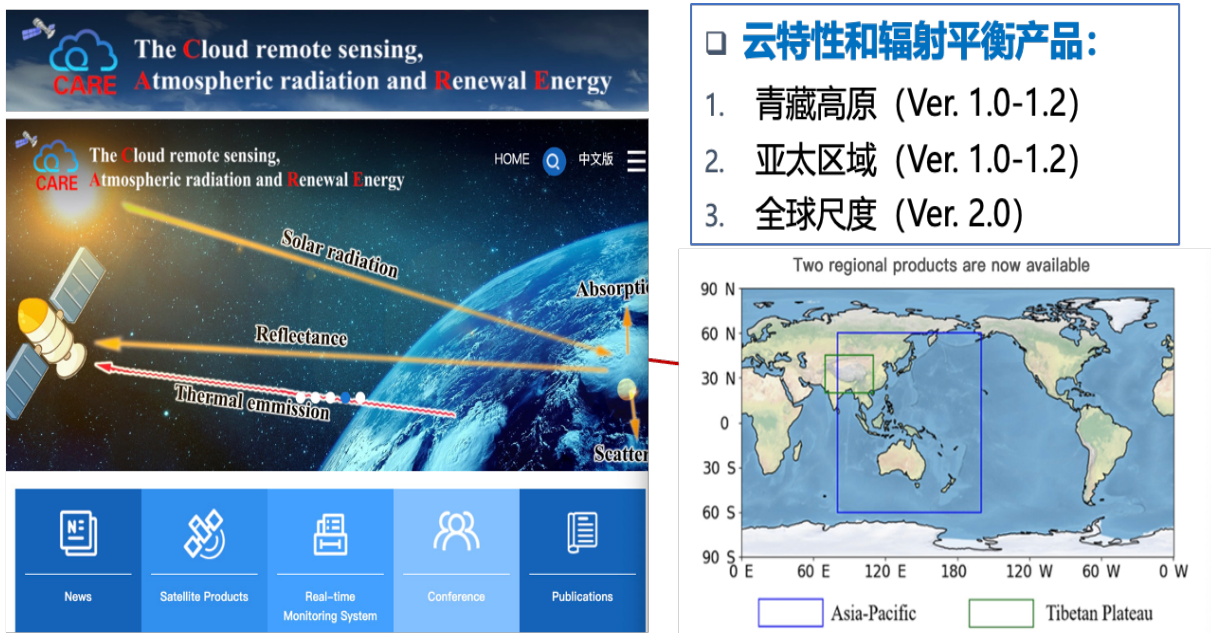


图 4 产品主页和不同版本 (<http://www.slrss.cn/care/>)

CARE 2.0 算法技术档案 (Copyright©CARE 2026)

表 1 不同版本的产品列表 (青藏高原: 0.01°/1h, 东亚: 0.05°/10min, 全球: 0.05°/1h)

产品	参数	时间范围	数据范围	日间/夜间
气溶胶	Angstrom 指数	2016-2024	青藏高原/东亚/全球	日间
	气溶胶光学厚度			
	细模态百分比			
	单次散射反照率			
水汽	大气可降水	2016-2024	青藏高原/东亚/全球	日间
云宏观物理	云量	2016-2024	青藏高原/东亚/全球	日间+夜间
	云相态			
	过冷水识别			
	云类别(ISCCP)			
	云顶高度			
	云顶温度			
云光学和微物理特性	云光学厚度	2016-2024	青藏高原/东亚/全球	日间
	云粒子有效半径(1.6um)			
	云粒子有效半径(2.3um)			
	云粒子有效半径(3.9um)			
云水路径				
云辐射强迫	云短波辐射强迫(地表)	2016-2024	青藏高原/东亚/全球	日间 + 夜间
	云短波辐射强迫(大气层顶)			
	云长波辐射强迫(地表)			
	云长波辐射强迫(大气层顶)			
辐射	地表下行短波辐射(总辐射)	2016-2024	青藏高原/东亚/全球	日间
	地表下行短波辐射(直射)			
	大气层顶上行短波辐射(漫射)			
	地表下行光合有效辐射(总辐射)			
	地表下行光合有效辐射(直射)			
	大气层顶上行光合有效辐射(漫射)			
	地表下行 UVA(总辐射)			
	地表下行 UVA(直射)			
	大气层顶上行 UVA(漫射)			
	地表下行 UVB(总辐射)			
	地表下行 UVB(直射)			

	大气层顶上行 UVB (漫射)			
	地表下行长波辐射			
大气层顶和地表辐射强迫	地表短波辐射强迫	2016-2024	青藏高原/东亚/全球	日间
	大气层顶短波辐射强迫			+
	地表长波辐射强迫			夜间
	大气层顶长波辐射强迫			
地表温度与发射率	晴空地表温度	2016-2024	青藏高原/东亚/全球	日间
	晴空地表发射率			+
	全天候地表温度			夜间

3. CARE 模型、算法和产品精度评估及应用

3.1 模型应用

近年来，冰云在全球气候模式中的辐射效应受到越来越多关注，而不同冰云参数化方案对模式结果的敏感性一直是气候模拟领域的重要科学问题。Li 等 (Li et al., 2023) 基于 CARE 框架下的 Voronoi 非规则形状冰晶散射模型数据库以及机载粒子谱分布数据 (Heymsfield et al., 2013)，构建了一套新的冰云光学特性参数化方案，并与国际主流的四种冰云参数化方案 (Baum-Yang05 (Baum et al., 2005a, Baum et al., 2005b)、Yi (Yi et al., 2013)、Fu (Fu, 1996) 和 Mitchell (Mitchell et al., 1996b, Mitchell et al., 2006)) 比较，评估其在全球气候模式中的辐射表现。该研究将 5 种方案 (Voronoi、Baum-Yang05、Yi、Fu 和 Mitchell) 潜入到清华大学带头联合其他单位共同研发的地球系统模式 CIESM (Community Integrated Earth System Model) (Lin et al., 2020) 中，并利用 CERES EBAF 产品对 2001—2010 年十年平均的大气层顶短波和长波云辐射强迫模拟结果进行验证。结果显示，Voronoi 方案与 EBAF 观测的一致性显著优于国际现有的其他四种方案，尤其在冰云高频出现的赤道区域表现突出(图 5)，验证了 Voronoi 冰晶散射模型在 CIESM 全球气候模式中表征冰云辐射特性的可行性与潜在优势。

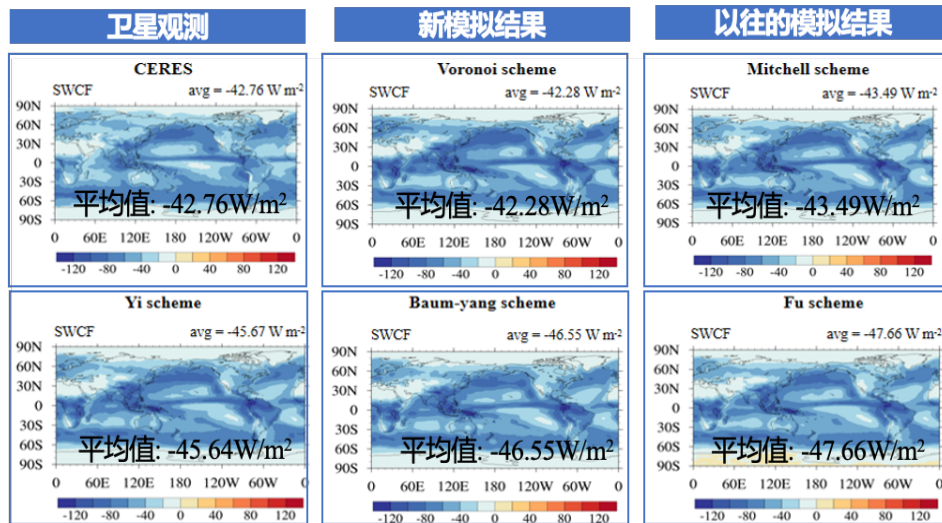


图 5 Voronoi 散射模型对冰云辐射强迫的评估效果 (Li et al., 2021)

3.2 算法和产品应用

近年来, Voronoi 冰晶散射模型及数据库被日本航空局 JAXA 的 GCOM-C 卫星 (Letu et al., 2016, Nakajima et al., 2019)、Himawari-8 卫星及欧洲空间局 ESA 和 JAXA 共同开发的 EarthCARE 卫星冰云特性参数官方算法和遥感产品采纳应用(Letu et al., 2019, Letu et al., 2020), 偏振多角度水云参数算法被 ESA 的 3MI 卫星计划水云特性参数官方算法采纳 (Shang et al., 2024)。CARE 计划的气溶胶反演算法 (Shi et al., 2019, Shi et al., 2021)被国际碳卫星 GOSAT-2 作为官方算法采纳 (<https://prdct.gosat-2.nies.go.jp/index.html.en>)。同时也被国际气候卫星 GCOM-C 研究算法采纳 (Nakajima et al., 2019), 气溶胶及水色同步反演算法 (Shi et al., 2021, Zhang et al., 2023)被国产 FY-3F 卫星官方采纳 (<https://satellite.nsmc.org.cn/DataPortal/cn/home/index.html>)。过冷水和混合云相态识别算法 (Wang et al., 2019)被应用于德国科学观测试验飞机的 HALO-South 南大洋观测实验, 为飞行实验轨迹的实时调整提供了云相态宏观与微观结构特征的基础依据 (<https://www.dlr.de/en/latest/news/2025/halo-south-hunts-trace-gases-in-clean-air>)。

最新的 CARE 产品完成了全球尺度高时空分辨率 (5km/30min) 云量、云相态、云水含量及地表下行短波辐射等遥感产品研制, 构建了近全球尺度地表下行短波辐射的近实时监测系统(Shi et al., 2025), 深化了对云-辐射-气候相互作用的认识 (Xian et al., 2024, Yue, 2020), 揭示了复杂山区云和辐射的时空分布及变化特征。云特性产品的应用则体现在两个层面: 在云宏观物理层面, 支撑了中国区域 (尤其是青藏高原和中国东部) 的日变化和季节变化特征分析 (Lei et al., 2020); 在云微观物理层面, 首次实现了液态层状云中离散效应对气溶胶-云相互作用的全球定量评估(Wang et al., 2025a)。下文将对 CARE 产品的部分应用进行详细介绍。

随着全球气候变化和人类活动的加剧, 地表短波辐射的精细化监测对于研究地气系统能量收支、评估太阳能资源以及揭示气候变化影响至关重要。Shi 等 (Shi et al., 2025)通过整合来自 FY-4、Himawari-8、MSG 和 GOES-16 等四颗静止气象卫星的观测资料, 提出了一种近全球尺度地表下行辐射的近实时监测方法 (GSNO 系统)。该方法将多源卫星观测与高效辐射传输模型相结合, 并引入人工智能技术优化检索过程, 显著提高了辐射产品的精度与时效性。系统在反演过程中综合考虑了不同卫星传感器的光谱响应特性, 通过统一的云识别、气溶胶反演和地表反照率处理方案, 确保了多源资料在重叠区域的无缝拼接和一致性。借助静止卫星的高时间分辨率 (10-15 分钟) 和较高空间分辨率 (公里级), 该系统能够捕捉辐射在日变化和天气过程中的快速变化, 为研究气候变化、能量收支以及光合作用提供了关键数据支持。与传统基于极轨卫星或再分析资料的辐射产品相比, 该系统具有更好的时空连续性和更低的不确定性, 适用于极端天气监测和区域能量平衡研究。该研究为全球辐射监测提供了新的技术路径, 有助于推进精细化气候模拟和太阳能资源评估。

近实时遥感监测系统中 CARE 全球地表短波辐射及其分量分布如图 6 所示, CARE 与 ERA5、CERES 产品比较在时空分辨率上有显著优势。如图 6 (b) 中的中国东部沿海台风和青藏高原复杂地形地表短波辐射空间分布个例显示, CARE 凭借其高空间分辨率, 可以清晰地刻画云团边缘、台风眼壁及复杂地形效应引起的辐射细微结构。利用地面辐射基准观测网络 (BSRN) 的实测数据进行量化评估, 结果进一步证实了 CARE 在三个精度指标上均表现最佳: 相关系数最高 ($R=0.92$), 表明其最能准确捕捉辐射的空间分布; 均方根

误差最小 ($RMSE=27.48 \text{ W m}^{-2}$)，说明其整体估算精度最高；平均偏差最小 ($MBE=1.29 \text{ W m}^{-2}$)，整体精度优于 CERES ($R=0.91, RMSE=29.59 \text{ W m}^{-2}, MBE=3.62 \text{ W m}^{-2}$) 和 ERA5 ($R=0.87, RMSE=35.36 \text{ W m}^{-2}, MBE=2.09 \text{ W m}^{-2}$) 产品 (Shi et al., 2025)。

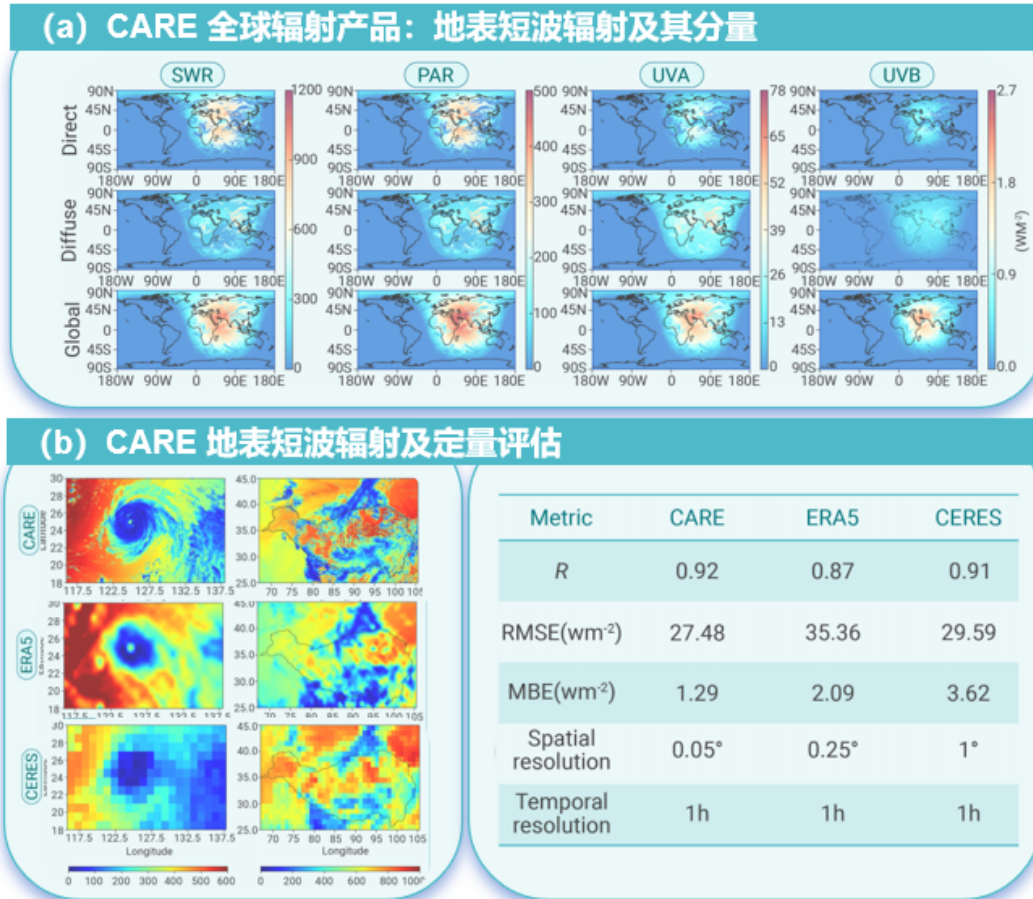


图 6 GSNO 系统提供的 CARE 全球地表短波辐射及各分量产品(a): CARE、CERES 和 ERA5 的地表短波辐射 (SWR) 产品, (b) 图分别展示了 2018 年 7 月 10 日 08:00 UTC 台风区域 (左) 和 2018 年 8 月 1 日 04:00 UTC 青藏高原地区 (右) 的地表短波辐射空间分布, 表给出了与 2018 年 8 月站点实测 (BSRN) 日均值的定量评估结果 (Shi et al., 2025)。

研究表明地形辐射强迫效应在山区的辐射时空分布中扮演了至关重要的角色，尤其是在坡度较大、地形复杂的区域。青藏高原年均地表下行短波辐射为 $169 \pm 38.4 \text{ W/m}^2$ ，其中地形辐射强迫的贡献率可达 9.5%，忽略地形效应会导致青藏高原北坡区域的地表下行短波辐射被严重高估，在冬季最大可导致超过 150% 的高估 (Xian et al., 2024)。定量评估的结果表明在山区辐射研究中必须充分考虑地形的影响，才能提高辐射估算的精度和可靠性。基于高时空分辨率的 CARE 数据开展了中国地区太阳辐射组分的变化分析和太阳能资源潜力评估，研究表明中国大部分地区的太阳辐射各组成部分均呈现上升趋势，其中短波辐射与 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著负相关 ($R = -0.91, p < 0.05$)。中国西部是太阳能资源开发的核心区域，厄尔尼诺等大气环流模式可以通过影响云量来调节区域辐射 (Li et al., 2024)。

CARE 产品在气溶胶—云—辐射过程研究中的重要价值，特别是在气候变化研究中，为理解云—辐射—气候相互作用提供了高质量的数据支持(Letu et al., 2023)。针对人类活动与大气环境之间相互作用的一个典型案例研究，评估了 2020 年初新冠疫情蔓延期间中国实施防控措施的短期影响，发现人类活动导致的碳排放和近地表大气污染物水平较 2019 年显著下降，中东部地区气溶胶光学厚度降低，CARE 地表晴空短波辐射同比升高约 11.6 W/m^2 (9.6%)，人类活动引起的碳排放和大气污染物浓度等与地表太阳辐射收支密切相关，进一步对气候和局地大气环流可能产生影响(Yue, 2020)。CARE 产品未来将进一步结合数值模式，量化人为排放与气象条件对污染物变化的相对贡献，并评估大气污染变化对气候、生态和公共健康的长期影响。

CARE 数据产品为亚太和青藏高原区域的云日变化研究提供了重要支持，高时空分辨率数据不仅揭示了云-辐射-地表过程的相互作用机制，也为区域天气预报、气候变化预测、太阳能光伏资源评估等跨行业应用奠定了坚实的基础。在青藏高原和中国东部地区云-辐射的日变化尤为显著(Bao et al., 2024, Lei et al., 2020, Shang et al., 2017)，通过分析云出现频率、云顶高度及其昼夜变化特征，为理解该地区的能量收支、对流触发以及对下游季风系统的影响提供了关键观测依据。CARE 云量产品与 ISCCP H-series 多源卫星融合数据、再分析数据 ERA5 和 ERA-Interim 的比较研究，揭示 CARE 能更好地表征青藏高原云量的日变化。CARE 揭示高原春季白天云量增加可达 30%，ERA5 能模拟出约 15% 的增加，ISCCP 由于时间分辨率较低 (3 小时)，对日变化捕捉能力不足。高时空分辨率的卫星云反演产品是评估复杂地形区再分析云量的关键参考，ERA5 在云量模拟方面相比 ERA-Interim 有明显改进，以准确率和误报率作为评判标准，中国东部地区云量模拟 ERA-Interim 准确率从 55% 提高到 ERA5 准确率 70%；然而，在青藏高原两套再分析产品云量模拟的准确率低于 50%，青藏高原是数值模拟的难点区域(Lei et al., 2020)。

基于 Bao 等 (Bao et al., 2024) 改进的云分类算法，青藏高原云系结构分布更合理，进一步对 2001–2023 年 CERES 卫星数据的分析表明青藏高原云系结构发生了显著变化。高原云量总体虽然呈下降趋势，但垂直分布出现了明显相反的变化，高云量大幅减少，而低云量显著上升。高低云量变化相反的驱动机制主要在于大气动力和热力的协同演变，高层大气的“增温-变干-上升”组合抑制了高云发展，而低层大气的升温、轻微增湿及上升运动则为低云增长创造了条件，气溶胶的增加进一步促进了低云增多。高原云系转变对地表能量收支产生了决定性影响，高云减少削弱了其温室效应，而低云及白天中云的增长则通过增强短波反射主导了净冷却效应的强化，最终使区域气候系统呈现净的负辐射强迫，在一定程度上缓冲了全球变暖的局部影响。

CARE 云微观特性反演参数为揭示气溶胶-云相互作用机制、约束并改进气候模式参数化方案提供了重要科学支撑。人为气溶胶的增加会改变水云中云滴粒径分布 (云滴谱型)，从而影响云的辐射强迫，这一过程被称为离散效应，是气溶胶-云相互作用的重要组成部分。然而，由于缺乏基于卫星观测的全球定量化方法，当前对气溶胶气候效应的观测估算普遍忽略离散效应，导致结果存在不可忽视的系统性偏差。此外，气候模式中的云滴谱参数化方案大多基于区域性飞机观测，缺乏全球尺度的观测对比和有效验证，制约了其进一步发展和改进。针对上述问题，团队利用多角度偏振卫星 POLDER 反演的云滴有效半径和有效方差(Shang et al., 2019)，提出了基于云微物理机理与方程推导的新方法，首

次实现了液态层状云中离散效应对气溶胶-云相互作用的全球定量评估。结果表明，离散效应对气溶胶-云相互作用具有显著调节作用，分别抵消了由云滴数浓度变化和液水路径调整引起作用的约 7.9% 和 -1.6% (图 7)，部分削弱了气溶胶对全球变暖的冷却效应 (Wang et al., 2025a)。在此基础上，研究团队构建了全球云滴谱参数数据集并提出新的参数化方案，可提升气候模式对液态层状云云滴谱及离散效应的模拟能力。与传统基于区域观测构建的方案相比，该方案具有更强的全球代表性和更好的模式适用性。

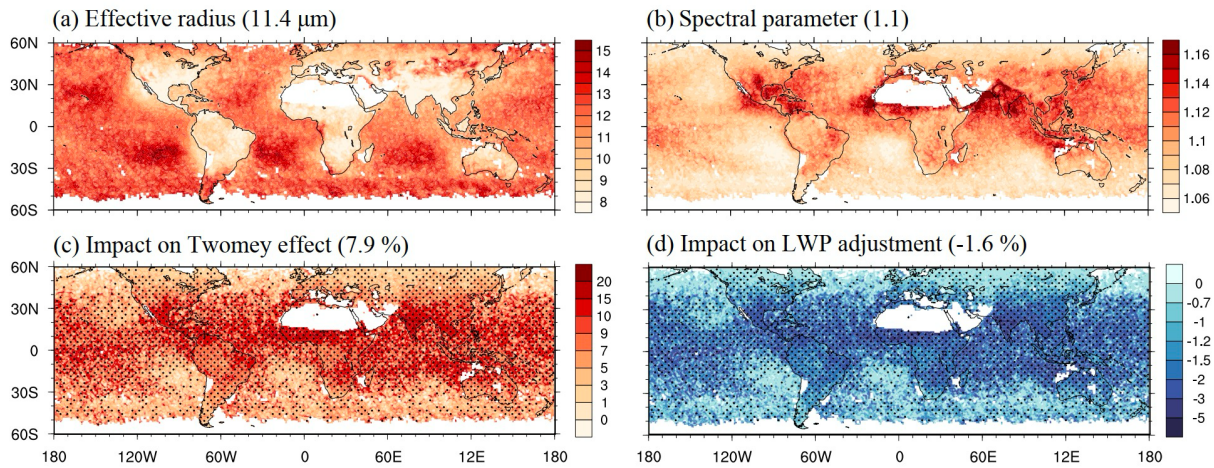


图 7. 基于多角度偏振卫星计算的 (a) 云滴有效半径、(b) 谱型参数、离散效应对 (c) Twomey 效应和 (d) LWP 调整效应影响的全球分布，打点处表示通过 95%置信度检验，括号内为全球 (60°S-60°N) 均值 (Wang et al., 2025a)

4. 回顾与展望

高时空分辨率的 CARE 遥感算法产品经历了长时间的积累和完善，自 2010 年开始开展云检测算法研究，前后开发了基于图像处理的云识别技术，成功应用于晴空区识别及地表特征参数的提取 (Letu et al., 2010, Letu et al., 2016)。2012 年起开展大气冰晶粒子散射模型构建及云特性参数遥感反演算法开发 (Letu et al., 2012)，2018 年至今通过 CARE 主页发布其特色遥感产品；2026 年构建了辐射传输模式 CARE-RTM (Shi et al., 2026)，这也是国际上为数不多的可以同时支持高光谱、偏振及海气耦合模拟能力的辐射传输模式。近期，主页还新增了多区域准实时监测平台，以满足地球系统科学及相关行业的应用需求。

CARE 产品的优势主要体现在其模型、算法、产品到应用的系统性和可扩展性，同时体现在高时空分辨率和高精度特征方面，此外还具备了全球尺度、全天时、全天候的大气和地表辐射能量平衡参数探测能力。然而它的不足之处也较为明显。主要体现在以下几个方面：1) 数据产品时间序列较短，参数完整性有限；2) 用户基础和应用领域有待拓展；3) 主页数据获取便利性及国际影响力有待提升；4) 算法开发中大模型与 AI 技术应用有待进一步加强。

未来计划开展的工作包括：1) 发展基于麦克斯韦方程的大气非规则粒子散射特性的数值计算方法和高性能辐射传输模式，推动物理和 AI 技术相结合的新模型和新算法开发；2) 利用多源静止及极轨卫星资料构建长时间序列遥感大数据处理及产品生产平台，形成大气及地表辐射关键要素的长时序、高精度反演与监测能力；3) 完善产品主页的可用性

和视觉体验，并通过暑期学校和 CARE 学术会议等途径提高产品的影响力；4) 提升 CARE 数据平台的共享能力、开放性及其共建能力，持续推动与相关行业部门的广泛合作。

References

- [1] An, N., Shang, H., Lesi, W., Ri, X., Shi, C., Tana, G., Bao, Y., et al., 2023. A cloud detection algorithm for early morning observations from the fy-3e satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 61, 1-15. doi: 10.1109/TGRS.2023.3304985.
- [2] Bao, F., Letu, H., Shang, H., Ri, X., Chen, D., Yao, T., Wei, L., et al., 2024. Advancing cloud classification over the tibetan plateau: A new algorithm reveals seasonal and diurnal variations. *Geophysical Research Letters* 51 (13), e2024GL109590. doi: <https://doi.org/10.1029/2024GL109590>.
- [3] Baran, A.J., Ishimoto, H., Sourdeval, O., Hesse, E., Harlow, C., 2018. The applicability of physical optics in the millimetre and sub-millimetre spectral region. Part ii: Application to a three-component model of ice cloud and its evaluation against the bulk single-scattering properties of various other aggregate models. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 206, 83-100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.10.027>.
- [4] Baum, B.A., Heymsfield, A.J., Yang, P., Bedka, S.T., 2005a. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part i: Microphysical data and models. *J. Appl. Meteorol.* 44 (12), 1885-1895. doi: <https://doi.org/10.1175/JAM2308.1>.
- [5] Baum, B.A., Yang, P., Heymsfield, A.J., Platnick, S., King, M.D., Hu, Y.X., Bedka, S.T., 2005b. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part ii: Narrowband models. *J. Appl. Meteorol.* 44 (12), 1896-1911. doi: <https://doi.org/10.1175/JAM2309.1>.
- [6] Doelling, D.R., Sun, M., Nguyen, L.T., Nordeen, M.L., Haney, C.O., Keyes, D.F., Mlynczak, P.E., 2016. Advances in geostationary-derived longwave fluxes for the ceres synoptic (syn1deg) product. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 33 (3), 503-521. doi: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0147.1>.
- [7] Fu, Q.A., 1996. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models. *J Climate* 9 (9), 2058-2082. <Go to ISI>://WOS:A1996VM99700006.
- [8] Gupta, S.K., Ritchey, N.A., Wilber, A.C., Whitlock, C.H., Gibson, G.G., Stackhouse, P.W., 1999. A climatology of surface radiation budget derived from satellite data. *Journal of Climate* 12 (8), 2691-2710. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2691:ACOSRB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2691:ACOSRB>2.0.CO;2).
- [9] Heymsfield, A.J., Schmitt, C., Bansemer, A., 2013. Ice cloud particle size distributions and pressure-dependent terminal velocities from in situ observations at temperatures from 0° to -86°C. *J Atmos Sci* 70 (12), 4123-4154. doi: doi:10.1175/JAS-D-12-0124.1.
- [10] Ishimoto, H., Masuda, K., Mano, Y., Orikasa, N., Uchiyama, A., 2012. Irregularly shaped ice aggregates in optical modeling of convectively generated ice clouds. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 113 (8), 632-643. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.01.017>.
- [11] Ji, D., Shi, J., Xiong, C., Wang, T., Zhang, Y., 2017. A total precipitable water retrieval method over land using the combination of passive microwave and optical remote sensing. *Remote Sens Environ* 191, 313-327. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.028>.
- [12] Ji, D., Shi, J., Letu, H., Li, W., Zhang, H., Shang, H., 2021. A total precipitable water product and its trend analysis in recent years based on passive microwave radiometers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 14, 7324-7335. doi: 10.1109/JSTARS.2021.3096535.

- [13] Ji, D., Letu, H., Ri, X., Xu, N., Li, X., Li, X., Zhang, G., Wang, Y., Shi, J., 2025. A new dynamically updated geostationary satellite precipitation estimation algorithm for near real-time condition. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 63, 1-22. doi: 10.1109/TGRS.2025.3583904.
- [14] Author, 2022. Global daily total precipitable water dataset in all weather condition based on amsr-e and amsr2 (2002-2017). Publisher. <https://dx.doi.org/10.11888/Atmos.tpdc.272832>.
- [15] King, M.D., Platnick, S., Menzel, W.P., Ackerman, S.A., Hubanks, P.A., 2013. Spatial and temporal distribution of clouds observed by modis onboard the terra and aqua satellites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51 (7), 3826-3852. doi: 10.1109/TGRS.2012.2227333.
- [16] Lei, Y., Letu, H., Shang, H., Shi, J., 2020. Cloud cover over the tibetan plateau and eastern china: A comparison of era5 and era-interim with satellite observations. *Climate Dynamics* 54 (5), 2941-2957. doi: 10.1007/s00382-020-05149-x.
- [17] Letu, H., Nakajima, T., Matsui, T., 2012. Development of an ice crystal scattering database for the global change observation mission/second generation global imager satellite mission: Investigating the refractive index grid system and potential retrieval error. *Appl. Opt.* 51, 6172-6178. doi: 10.1364/AO.51.006172.
- [18] Letu, H., Nagao, T., Nakajima, T., Matsumae, Y., 2014. Method for validating cloud mask obtained from satellite measurements using ground-based sky camera. *Appl. Opt.* 53, 7523-7533. doi: 10.1364/AO.53.007523.
- [19] Letu, H., Hara, M., Yagi, H., Naoki, K., Tana, G., Nishio, F., Shuhei, O., 2010. Estimating energy consumption from night-time dmps/ols imagery after correcting for saturation effects. *International Journal of Remote Sensing* 31 (16), 4443-4458. doi: 10.1080/01431160903277464.
- [20] Letu, H., Ishimoto, H., Riedi, J., Nakajima, T.Y., C.-Labonnote, L., Baran, A.J., Nagao, T.M., Sekiguchi, M., 2016. Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the gcom-c satellite mission. *Atmos. Chem. Phys.* 16 (18), 12287-12303. doi: 10.5194/acp-16-12287-2016.
- [21] Letu, H., Nagao, T.M., Nakajima, T.Y., Riedi, J., Ishimoto, H., Baran, A.J., Shang, H., Sekiguchi, M., Kikuchi, M., 2019. Ice cloud properties from himawari-8/ahi next-generation geostationary satellite: Capability of the ahi to monitor the dc cloud generation process. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 57 (6), 3229-3239. doi: 10.1109/TGRS.2018.2882803.
- [22] Letu, H., Yang, K., Nakajima, T.Y., Ishimoto, H., Nagao, T.M., Riedi, J., Baran, A.J., et al., 2020. High-resolution retrieval of cloud microphysical properties and surface solar radiation using himawari-8/ahi next-generation geostationary satellite. *Remote Sensing of Environment* 239, 111583. doi: 10.1016/j.rse.2019.111583.
- [23] Letu, H., Nakajima, T.Y., Wang, T., Shang, H., Ma, R., Yang, K., Baran, A.J., et al., 2022. A new benchmark for surface radiation products over the east asia-pacific region retrieved from the himawari-8/ahi next-generation geostationary satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society* 103 (3), E873-E888. doi: 10.1175/BAMS-D-20-0148.1.
- [24] Letu, H., Ma, R., Nakajima, T.Y., Shi, C., Hashimoto, M., Nagao, T.M., Baran, A.J., et al., 2023. Surface solar radiation compositions observed from himawari-8/9 and fengyun-4 series. *Bulletin of the American Meteorological Society* 104 (10), E1772-E1789. doi: 10.1175/BAMS-D-22-0154.1.
- [25] Li, A., Shi, C., Yin, S., Li, N., Letu, H., Shi, G., 2024. Variation of surface solar radiation components from 2016 to 2020 in china: Perspective from geostationary satellite observation

- with a high spatiotemporal resolution. *Science of The Total Environment* 954, 176264. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.176264.
- [26] Li, M., Letu, H., Ishimoto, H., Li, S., Liu, L., Nakajima, T.Y., Ji, D., Shang, H., Shi, C., 2023. Retrieval of terahertz ice cloud properties from airborne measurements based on the irregularly shaped voronoi ice scattering models. *Atmos. Meas. Tech.* 16 (2), 331-353. doi: 10.5194/amt-16-331-2023.
- [27] Li, X., Che, T., Li, X., Wang, L., Duan, A., Shanguan, D., Pan, X., Fang, M., Bao, Q., 2020. Casearth poles: Big data for the three poles. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 101 (9), E1475-E1491. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0280.1>.
- [28] Li, Z., Niu, F., Fan, J., Liu, Y., Rosenfeld, D., Ding, Y., 2011. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation. *Nat. Geosci.* 4 (12), 888-894. doi: 10.1038/ngeo1313.
- [29] Liang, S., Cheng, J., Jia, K., Jiang, B., Liu, Q., Xiao, Z., Yao, Y., et al., 2021. The global land surface satellite (glass) product suite. *Bulletin of the American Meteorological Society* 102 (2), E323-E337. doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0341.1>.
- [30] Lin, Y., Huang, X., Liang, Y., Qin, Y., Xu, S., & Huang, W., al., e., 2020. Community integrated earth system model (ciesm): Description and evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 12, 0.
- [31] Ma, R., Letu, H., Yang, K., Wang, T., Shi, C., Xu, J., Shi, J., Shi, C., Chen, L., 2020. Estimation of surface shortwave radiation from himawari-8 satellite data based on a combination of radiative transfer and deep neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 58 (8), 5304-5316. doi: 10.1109/TGRS.2019.2963262.
- [32] Mitchell, David, L., Liu, Yangang, Macke, Andreas, 1996b. Modeling cirrus clouds. Part ii: Treatment of radiative properties. *J. Atmos. Sci* 53 (20), 2967-2988.
- [33] Mitchell, D.L., Baran, A.J., Arnott, W.P., Schmitt, C., 2006. Testing and comparing the modified anomalous diffraction approximation. *J Atmos Sci* 63 (11), 2948-2962. <Go to ISI>://WOS:000242442700016.
- [34] 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. *Journal of Atmospheric Sciences* 47 (15), 1878-1893. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<1878:DOTOTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<1878:DOTOTA>2.0.CO;2).
- [35] Nakajima, T., Ishida, H., Nagao, T., Hori, M., Letu, H., Higuchi, R., Tamaru, N., Imoto, N., Yamazaki, A., 2019. Theoretical basis of the algorithms and early phase results of the gcom-c (shikisai) sgli cloud products. *Progress in Earth and Planetary Science* 6 doi: 10.1186/s40645-019-0295-9.
- [36] Nakajima, T.Y., Nakajima, T., 1995. Wide-area determination of cloud microphysical properties from noaa avhrr measurements for fire and astex regions. *Journal of Atmospheric Sciences* 52 (23), 4043-4059. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<4043:WADOCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<4043:WADOCM>2.0.CO;2).
- [37] Rao, L., Xu, J., Efremenko, D.S., Loyola, D.G., Doicu, A., 2022. Aerosol parameters retrieval from tropomi/s5p using physics-based neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 15, 6473-6484. doi: 10.1109/JSTARS.2022.3196843.
- [38] Ri, X., Husi, L., Nakajima, T.Y., Shi, C., Gegen, T., Zhao, J., Zhang, P., Chen, L., Shi, J., 2021. Cloud, atmospheric radiation and renewal energy application (care) cloud top property

- product from himawari-8/ahi: Algorithm development and preliminary validation. 2021, A14B-08. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AGUFM.A14B..08R>.
- [39] Ri, X., Letu, H., Shi, C., Nakajima, T.Y., Shang, H., Bao, F., Sude, B., et al., 2024. Cloud top temperature and cloud optical thickness can effectively identify convective clouds over the tibetan plateau. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 62, 1-11. doi: 10.1109/TGRS.2024.3486463.
- [40] Rosenfeld, D., Zhu, Y., Wang, M., Zheng, Y., Goren, T., Yu, S., 2019. Aerosol-driven droplet concentrations dominate coverage and water of oceanic low-level clouds. *Science* 363 (6427), eaav0566. doi: 10.1126/science.aav0566.
- [41] Seinfeld, J.H., Bretherton, C., Carslaw, K.S., Coe, H., DeMott, P.J., Dunlea, E.J., Feingold, G., et al., 2016. Improving our fundamental understanding of the role of aerosol–cloud interactions in the climate system. *Proc Natl Acad Sci* 113 (21), 5781-5790. doi: 10.1073/pnas.1514043113.
- [42] Sekiguchi, M., Nakajima, T., 2008. A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 109 (17), 2779-2793. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2008.07.013>.
- [43] Shang, H., Chen, L., Letu, H., Zhao, M., Li, S., Bao, S., 2017. Development of a daytime cloud and haze detection algorithm for himawari-8 satellite measurements over central and eastern china. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122 (6), 3528-3543. doi: <https://doi.org/10.1002/2016JD025659>.
- [44] Shang, H., Letu, H., Pan, X., Wang, Z., Ma, R., Liu, C., Dai, T., et al., 2019. Diurnal haze variations over the north china plain using measurements from himawari-8/ahi. *Atmospheric Environment* 210, 100-109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.036>.
- [45] Shang, H., Letu, H., Xu, R., Wei, L., Wu, L., Shao, J., Nagao, T.M., et al., 2024. A hybrid cloud detection and cloud phase classification algorithm using classic threshold-based tests and extra randomized tree model. *Remote Sens Environ* 302, 113957. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113957>.
- [46] Shao, J., Letu, H., Ri, X., Tana, G., Wang, T., Shang, H., 2023. Estimation of surface downward longwave radiation and cloud base height based on infrared multichannel data of himawari-8. *Atmosphere* 14 (3), 493. <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/3/493>.
- [47] Shi, C., Hashimoto, M., Nakajima, T., 2019. Remote sensing of aerosol properties from multi-wavelength and multi-pixel information over the ocean. *Atmos. Chem. Phys.* 19 (4), 2461-2475. doi: 10.5194/acp-19-2461-2019.
- [48] Shi, C., Hashimoto, M., Shiomi, K., Nakajima, T., 2021. Development of an algorithm to retrieve aerosol optical properties over water using an artificial neural network radiative transfer scheme: First result from gosat-2/cai-2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 59 (12), 9861-9872. doi: 10.1109/TGRS.2020.3038892.
- [49] Shi, C., Letu, H., Nakajima, T.Y., Nakajima, T., Wei, L., Xu, R., Lu, F., et al., 2025. Near-global monitoring of surface solar radiation through the construction of a geostationary satellite network observation system. *Innovation* 6 (5), 100876. doi: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100876>.
- [50] Shi C, Letu H., Nakajima T, et al., 2026. CARE radiative transfer model: A tool for supporting polarization and hyperspectral radiative transfer simulation in the coupled atmosphere-ocean system. *Advances in atmospheric sciences. Adv. Atmos. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s00376-026-5676-6>

- [51] SHi, G.-Y., 1992. Radiative forcing and greenhouse effect due to the atmospheric trace gases. *Science in China Series B-Chemistry, Life Sciences & Earth Sciences* 35 (2), 217-229. doi: <https://doi.org/10.1360/yb1992-35-2-217>.
- [52] Shi, G., 1998. On the k-distribution and correlated k-distribution models in the atmospheric radiation calculations. *dqkx* 22 (4), 659-676. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.25.
- [53] Stephens, G.L., Li, J., Wild, M., Clayson, C.A., Loeb, N., Kato, S., L'Ecuyer, T., Stackhouse, P.W., Lebsock, M., Andrews, T., 2012. An update on earth's energy balance in light of the latest global observations. *Nat. Geosci.* 5 (10), 691-696. doi: 10.1038/ngeo1580.
- [54] Sun, Q., Ji, D., Letu, H., Ni, X., Zhang, H., Wang, Y., Li, B., Shi, J., 2024. A method for estimating high spatial resolution total precipitable water in all-weather condition by fusing satellite near-infrared and microwave observations. *Remote Sensing of Environment* 302, 113952. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113952>.
- [55] Tana, G., Ri, X., Shi, C., Ma, R., Letu, H., Xu, J., Shi, J., 2023. Retrieval of cloud microphysical properties from himawari-8/ahi infrared channels and its application in surface shortwave downward radiation estimation in the sun glint region. *Remote Sensing of Environment* 290, 113548. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113548>.
- [56] Tang, C., Shi, C., Letu, H., Yin, S., Nakajima, T., Sekiguchi, M., Xu, J., Zhao, M., Ma, R., Wang, W., 2025. Development of a hybrid algorithm for the simultaneous retrieval of aerosol optical thickness and fine-mode fraction from multispectral satellite observation combining radiative transfer and transfer learning approaches. *Remote Sensing of Environment* 319, 114619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114619>.
- [57] Tang, W., Yang, K., Qin, J., Li, X., Niu, X., 2019. A 16-year dataset (2000–2015) of high-resolution (3 h, 10 km) global surface solar radiation. *Earth Syst. Sci. Data* 11 (4), 1905-1915. doi: 10.5194/essd-11-1905-2019.
- [58] Wang, D., Liang, S., Zhang, Y., Gao, X., Brown, M., Jia, A., 2020a. A new set of modis land products (mcd18): Downward shortwave radiation and photosynthetically active radiation. *Remote Sens* 12, 168. doi: 10.3390/rs12010168.
- [59] Wang, D., Liang, S., Zhang, Y., Gao, X., Brown, M.G.L., Jia, A., 2020b. A new set of modis land products (mcd18): Downward shortwave radiation and photosynthetically active radiation. *Remote Sensing*. 12.
- [60] Wang, H., Peng, Y., Di Noia, A., Shang, H., Letu, H., van Dienenhoven, B., Hasekamp, O.P., Liu, Y., Quaas, J., 2025a. Global quantification of the dispersion effect with polder satellite data. *Nature Communications* 16 (1), 7087. doi: 10.1038/s41467-025-62238-3.
- [61] Wang, T., Yan, G., Mu, X., Jiao, Z., Chen, L., Chu, Q., 2018. Toward operational shortwave radiation modeling and retrieval over rugged terrain. *Remote Sensing of Environment* 205, 419-433. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.006>.
- [62] Wang, W., Shi, C., Xu, J., Yin, S., Shang, H., Wang, Y., Tang, C., Yao, R., Shi, G., Letu, H., 2025b. Passive remote sensing of marine liquid cloud geometric thickness using the o2–o2 band: First results from tropomi. *Geophys. Res. Lett.* 52 (3), e2024GL113222. doi: <https://doi.org/10.1029/2024GL113222>.
- [63] Wang, Z., Letu, H., Shang, H., Bugliaro, L., 2024. Technical note: Retrieval of the supercooled liquid fraction in mixed-phase clouds from himawari-8 observations. *Atmos. Chem. Phys.* 24 (13), 7559-7574. doi: 10.5194/acp-24-7559-2024.
- [64] Wang, Z., Letu, H., Shang, H., Zhao, C., Li, J., Ma, R., 2019. A supercooled water cloud detection algorithm using himawari-8 satellite measurements. *J. Geophys. Res.:Atmos.* 124 (5), 2724-2738. doi: <https://doi.org/10.1029/2018JD029784>.

- [65] Wei, L., Shang, H., Xu, J., Shi, C., Tana, G., Chao, K., Bao, S., Chen, L., Letu, H., 2024. Cloud top pressure retrieval using polarized and oxygen a-band measurements from gf5 and parasol satellites. *Adv. Atmos. Sci.* 41 (4), 680-700. doi: 10.1007/s00376-023-2382-5.
- [66] Xian, Y., Wang, T., Leng, W., Letu, H., Shi, J., Wang, G., Yan, X., Yuan, H., 2024. Can topographic effects on solar radiation be ignored: Evidence from the tibetan plateau. *Geophysical Research Letters* 51 (6), e2024GL108653. doi: <https://doi.org/10.1029/2024GL108653>.
- [67] Yang, P., Liou, K.N., 1996. Finite-difference time domain method for light scattering by small ice crystals in three-dimensional space. *J. Opt. Soc. Am. A* 13 (10), 2072-2085. doi: 10.1364/JOSAA.13.002072.
- [68] Yang, P., Wei, H., Huang, H.-L., Baum, B.A., Hu, Y.X., Kattawar, G.W., Mishchenko, M.I., Fu, Q., 2005. Scattering and absorption property database for nonspherical ice particles in the near- through far-infrared spectral region. *Appl. Opt.* 44 (26), 5512-5523. doi: 10.1364/AO.44.005512.
- [69] Yao, R., Shi, C., Letu, H., et al., 2026, A physics-based AI algorithm integrating radiative transfer and machine learning for joint retrieval of aerosol layer height and optical thickness from hyperspectral satellite observations over the ocean, *Remote Sensing of Environment*, vol. 338, p. 115379, 2026.
- [70] Yi, B.Q., Yang, P., Baum, B.A., L'Ecuyer, T., Oreopoulos, L., Mlawer, E.J., Heymsfield, A.J., Liou, K.N., 2013. Influence of ice particle surface roughening on the global cloud radiative effect. *J Atmos Sci* 70 (9), 2794-2807. <Go to ISI>://WOS:000323890400008.
- [71] Ying, T., Li, J., Jiang, Z., Liu, G., Zhang, Z., Zhang, L., Dong, Y., Zhao, C., 2023. Increased aerosol scattering contributes to the recent monsoon rainfall decrease over the gangetic plain. *Sci Bull* 68 (21), 2629-2638. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.08.052>.
- [72] Yue, X., Lei, Y., Zhou, H., Liu, Z., Letu, H., Cai, Z., ... & Liao, H, 2020. Changes of anthropogenic carbon emissions and air pollutants during the covid-19 epidemic in china. *Transactions of Atmospheric Sciences*.
- [73] Zhang, H., Zhao, C., Li, J., Yu, Y., Chen, A., Yang, Y., Xia, Y., et al., 2025. Shortwave cloud warming effect observed over highly reflective greenland. *Sci Bull* 70 (6), 951-959. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.01.027>.
- [74] Zhang, X., Shi, C., Si, Y., Letu, H., Wang, L., Tang, C., Xu, N., et al., 2023. Remote sensing of aerosols and water-leaving radiance from chinese fy-3/mersi based on a simultaneous method. *Remote Sens* 15, 5650. doi: 10.3390/rs15245650.
- [75] Zhang, Y., Rossow, W.B., Lacis, A.A., Oinas, V., Mishchenko, M.I., 2004. Calculation of radiative fluxes from the surface to top of atmosphere based on isccp and other global data sets: Refinements of the radiative transfer model and the input data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109 (D19)doi: <https://doi.org/10.1029/2003JD004457>.
- [76] Zhao, C., Sun, Y., Yang, J., Li, J., Zhou, Y., Yang, Y., Fan, H., Zhao, X., 2024. Observational evidence and mechanisms of aerosol effects on precipitation. *Sci Bull* 69 (10), 1569-1580. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.03.014>.
- [77] Letu, H., Shang, H., Ma, R., Shi, C., Nakajima, T. Y., Ishimoto, H., ... & Shi, G. (2026). CARE: A next-generation high resolution cloud and radiation remote sensing product and its Earth system applications. *Science Bulletin*. 71 (7), 1831-1842,