

卫星反演云粒子有效半径与飞机探测对比检验

徐小红^{1,2}, 刘贵华¹, 戴进¹, 岳治国^{3,2}

1. 陕西省气象科学研究所, 西安 710016;

2. 中国气象局 秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室, 西安 710016;

3. 陕西省人工影响天气中心, 西安 710016

摘要: 云粒子有效半径 (r_e) 的卫星遥感反演是研究云微物理特性和降水形成过程的关键技术, 在气溶胶—云相互作用、强对流天气监测预警及人工影响天气等领域具有重要应用价值。对卫星反演 r_e 的精确验证是保证相关应用可靠性的必要条件。本文利用改进的卫星 3.7 μm 通道云粒子有效半径反演算法, 基于 MODIS 和 AVHRR 观测数据反演了云粒子有效半径 ($r_{e,o}$), 对比分析了 22 架次飞机探测获得的大陆性积云的云粒子有效半径, 检验了反演算法的可靠性和准确性。检验结果表明: $r_{e,o}$ 与飞机探测 r_e 的一致性很高, 反演误差 $< 2.4 \mu\text{m}$, 与国际上海洋性层积云的 2 μm 反演误差接近; $r_{e,o}$ 与飞机探测 r_e 的相关系数达 0.79, 线性拟合斜率为 0.81, 而对应的 MODIS 云产品粒子有效半径 ($r_{e,p}$) 与飞机探测 r_e 的最大相关系数和线性拟合斜率分别为 0.43 和 0.32, 相对而言, $r_{e,o}$ 的准确性更高; $r_{e,o}$ 随温度 (高度) 的分布与飞机探测 r_e 随温度的变化趋势吻合。结果表明, 本文算法反演精度较高, 可为相关应用提供可靠的数据基础。

关键词: 遥感, 云粒子有效半径, 垂直廓线, 卫星反演, 飞机探测, 检验

中图分类号: P412.27/P2

引用格式: 徐小红, 刘贵华, 戴进, 岳治国. 2025. 卫星反演云粒子有效半径与飞机探测对比检验. 遥感学报, 29(8): 2589–2601

Xu X H, Liu G H, Dai J and Yue Z G. 2025. Comparative verification of cloud particle effective radius at cloud top by satellite retrieval and airborne measurement. National Remote Sensing Bulletin, 29(8): 2589–2601 [DOI: 10.11834/jrs.20254248]

1 引言

云覆盖地球表面 75% 的区域, 几乎所有的天气现象都与云的生成、变化和消散密不可分 (Wylie 等, 2005; Zeng 等, 2011; 尚华哲 等, 2022)。自 1960 年美国第一颗气象卫星 TRIOS 发射以来, 被动遥感卫星逐步成为观测云的宏微观和辐射特性的最有效手段之一。云粒子有效半径 (r_e) 是表征云中粒子大小的重要云物理特征参数, 基于卫星等观测了解云粒子大小和分布状况对于监测和预测天气系统、评估人工影响天气的播云条件和效果都具有重要意义 (Rosenfeld 等, 2005; 辛乐和姚展予, 2011; 徐小红 等, 2012a; Li 等, 2022)。此外, 了解云粒子有效半径对于定量研究气溶胶—云—降水相互作用和云辐射气候效应等

问题也至关重要 (Rosenfeld 等, 2019)。

随着卫星技术的不断发展和观测能力的提升, 基于卫星观测能够反演各种类型云的几何厚度、云顶高度、云顶温度和云相态等宏观特征参数, 以及云粒子相态、大小、形状、谱分布等微观特征参数, 加深了对云特征的理解 (Minnis 等, 1992; Rossow 和 Garder, 1993; Zhu 等, 2018; 岳治国 等, 2018; Wang 等, 2021)。在云参数反演方法中, 双波段反射率算法最具代表性, 是利用可见光 (如 0.64 μm) 和近红外波段 (如 1.6 μm 、2.1 μm) 的观测数据来反演云的光学厚度和粒子有效半径。在非吸收的可见光波段, 反射率主要与云的光学厚度相关, 而水汽吸收通道的反射率则主要受相态、粒径等因素影响。因此, 在区分相态的基础上, 可以联立非吸收通道和水汽吸收

收稿日期: 2024-07-10; 预印本: 2025-01-23

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42275085); 陕西省自然科学基金 (编号: 2024JC-YBMS-228)

第一作者简介: 徐小红, 研究方向为云降水与卫星云物理反演。E-mail: xu_xiaohong16@163.com

通信作者简介: 戴进, 研究方向为卫星云物理反演及人工影响天气。E-mail: djohn@sina.com

通道,达到同时估计光学厚度和粒子有效半径的目的。这一方法最早由Twomey和Seton(1980)提出,随后Nakajima和King(1990)扩展了其适用范围,并将其应用于MODIS观测的云光学厚度和粒子有效半径的反演。后来双波段反射率方法被广泛应用于国内外被动卫星的云特性参数反演中(Twomey和Cocks,1989;Nakajima等,1991;Ackerman等,1998;Rolland等,2000;Roebeling等,2013;赵凤生等,2002;傅云飞,2014;刘健,2015)。目前,云粒子有效半径的反演算法面临两大问题,一是冰云中复杂的冰晶形状对反演结果的影响,二是在反演计算时通常假设云在垂直方向上是均匀分布的单一云层,而实际云层通常不是均匀分布,导致了反演结果的偏差。Marshak等(2006)和Cornet等(2005)研究了三维辐射效应对粒子有效半径反演的影响。叶晶等(2009)基于MODIS,主要针对薄冰云覆盖在低层水云的多层云情形,研究了多层云的有效粒子半径等微物理参数的反演算法。

在双波段反射率算法的基础上,可见光通道(如 $0.64\text{ }\mu\text{m}$)和近/中红外通道(如 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.7\text{ }\mu\text{m}$),结合红外通道(如 $10.8\text{ }\mu\text{m}$ 和 $12\text{ }\mu\text{m}$)等联合反演云参数的方法也得到进一步发展,成为主流反演算法(Stone等,1990;Nakajima和Nakajima,1995;King等,1992;Platnick等,2003;刘健等,2003;Rosenfeld等,2004;周毓荃等,2008;周青等,2010;刘贵华等,2011a;陈英英等,2013)。此外,夜间的云参数光谱反演方法主要依赖于红外波段之间的亮温差来获得云的粒子有效半径、光学厚度和相态(Baum等,2003)。

卫星探测能够获取云顶附近的信息,为了解云内状况,通过各态历经假定进行时空转换,即用一定空间范围内不同发展高度的对流云簇顶部的温度(T)和 r_e ,近似代替某一对流云内部不同高度上的 T 和 r_e (T - r_e 廓线),从而得到这个区域对流云内不同高度上的云物理特征。在这个假定下,Rosenfeld和Lensky(1998)利用卫星资料反演了对流云的 T - r_e 垂直分布来了解云中微物理结构和降水形成过程,并提出了研究对流云发展和云降水物理过程的方法。该方法也应用于中国的暴雨、飏线和龙卷等强对流天气研究(戴进等,2010,2011;徐小红等,2012b,2018)、FY-3A/VIRR卫星数据的云微物理特征反演(刘贵华等,

2011b)、FY-4A/AGRI静止卫星数据的冰雹强对流识别和预警研究(徐小红等,2022),以及地形云和对流云增雨作业条件研究(刘贵华等,2011a;徐小红等,2012a)。基于卫星反演的 T - r_e 廓线,Freud等(2011)发展了云滴数浓度反演算法,Zhu等(2014)发展了对流云云底温度和边界层比湿的新反演方法,使得 T - r_e 分析方法的微物理应用得到了进一步拓展。目前,该方法已在卫星观测云垂直结构、云微物理特征和降水形成过程、气溶胶—云—降水相互作用以及人工影响天气等方面进行了广泛的应用。为了进一步提高卫星定量应用水平,还需不断完善云粒子有效半径卫星反演算法,并对反演的 r_e 进行检验(Han等,1994;Nakajima和Nakajima,1995;Painemal和Zuidema,2011;Min等,2012),这对提高卫星反演 r_e 的精度意义重大。

对于卫星反演云特性参数的检验,尤其是 r_e 以及 T - r_e 廓线的检验,通常是利用飞机携带云微物理探测设备入云探测所获资料与卫星反演的云参数比对,以检验云参数反演精度。Han等(1994)、Nakajima和Nakajima(1995)利用FIRE(First ISCCP Regional Experiment)外场试验,以及Platnick和Valero(1995)利用ASTEX(Atlantic Stratocumulus Transition Experiment)外场试验的飞机云微物理探测资料,对比分析了NOAA卫星反演的海洋性层积云的 r_e 与机载PMS观测结果的一致性,Painemal和Zuidema(2011)、Min等(2012)利用VOCALS-REx(The VAMOS Ocean-Cloud-Atmosphere-Land Study Regional Experiment)的外场试验资料,对比了MODIS反演的海洋性层积云的 r_e 与机载PMS和DMT的观测结果。对比结果表明NOAA/AVHRR和MODIS反演的 r_e 要比云内实测的 r_e 大 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右,这一偏差也与MODIS和POLDER对远海暖云卫星反演的 r_e 的偏差非常接近(Bréon和Doutriaux-Boucher,2005)。Kokhanovsky等(2013)利用VOCALS-REx外场试验的机载云微物理探测资料,检验了卫星反演的 T - r_e 廓线后发现,对于粒子有效半径变化有一定梯度的云,卫星反演的 T - r_e 廓线是可靠的。以上对于卫星反演的 r_e 及 T - r_e 廓线的检验都是针对水平变化很小的海洋性层积云,而利用飞机探测资料对不同区域、不同类型云卫星反演的 r_e 及 T - r_e 廓线的准确性检验更有必要。

通常 $1.6\ \mu\text{m}$ 、 $2.1\ \mu\text{m}$ 和 $3.7\ \mu\text{m}$ 通道都可用于云粒子有效半径的反演 (Nakajima 等, 2010), 可代表云顶之下不同距离的 r_e 。在这 3 个通道中, 由于 $3.7\ \mu\text{m}$ 通道的透射率最低, 反演的云粒子有效半径更能代表云顶附近的粒子有效半径 (Platnick, 2000; Rosenfeld 等, 2004), 是运用 $T-r_e$ 廓线分析确定对流云微物理结构和降水形成过程的基础 (Rosenfeld 和 Lensky, 1998)。研究还发现, 云的 3D 辐射效应对 $3.7\ \mu\text{m}$ 通道的影响较小 (Zhang 等, 2012)。因此, 本研究采用 $3.7\ \mu\text{m}$ 通道反演云顶粒子有效半径及 $T-r_e$ 廓线, 通过与多架次飞机探测大陆性积云获得的 r_e 和 $T-r_e$ 廓线对比, 以及对应的 MODIS 云粒子有效半径产品 (r_{e-p}) 与飞机探测的对比分析, 检验本文算法反演有效半径的可靠性和准确性。研究结果将为气溶胶—云相互作用机理研究、区域气候效应定量评估以及人工增雨效果监测等应用提供更可靠的云微物理参数遥感反演技术支持。

2 数据来源与处理方法

2.1 飞机探测数据

飞机探测数据采用印度 CAIPEEX (Cloud Aerosol Interaction and Precipitation Enhancement Experiment) 实验的机载云物理探测数据, 来源于网站 (<http://www.tropmet.res.in/~caipeex/> [2024-07-10]), 经过申请获得。由于印度常年受到水资源短缺的困扰, 对人工增雨有着持续且迫切的需求。CAIPEEX 实验中, 2009 年和 2010 年分别利用 PA-31T 飞机和 Aero Commander 690 A 飞机在印度地区开展了大陆性积云探测, 飞机在积云边缘采样, 飞行平均速度 PA-31T 大约 $85\ \text{m/s}$ 、Aero Commander 690 A 大约 $90\ \text{m/s}$ 。观测结果提供了该地区大陆云微物理探测数据集 (Kulkarni 等, 2012), 这为印度暖云粒子有效半径模式参数化提供了观测依据 (Nair 等, 2012), 并用于与 CALIPSO 和 CloudSat 卫星观测结果的比较 (Padmakumari 等, 2013)。

探测飞机搭载了美国液滴测量技术 DMT (Droplet Measurement Technology) 公司的云物理探测系统, 其中包括云滴探头 CDP (Cloud Droplet Probe)、云粒子图像仪 CIP (Cloud Imaging Probe)、云凝结核计数器 CCNC (Cloud Condensation Nuclei Counter) 以及飞机综合气象测量系统 AIMMS

(Aircraft Integrated Meteorological Measurement System) 等 (Kulkarni 等, 2012)。本研究中使用 2009 年 8—9 月和 2010 年 9—10 月的 CDP 探测数据, CDP 测量范围为 $2\text{—}50\ \mu\text{m}$, 分辨率 $1\text{—}2\ \mu\text{m}$, 具有 30 bins, 采样频率为 $1\ \text{Hz}$, 用来测量云滴等粒子的大小。用于对比检验卫星反演的 r_e 及其垂直廓线的准确性。

2.2 卫星数据

卫星数据使用来自地球观测系统 (EOS) Terra 和 Aqua 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)、NOAA 卫星搭载的高分辨率辐射计 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 的 L1B (Level 1B) 数据, 以及 MODIS 云产品 MOD/MYD06_L2 C6.1 数据。MODIS 和 NOAA 卫星的星下点分辨率分别为 $1.0\ \text{km}$ 和 $1.1\ \text{km}$ 。

2.3 数据处理方法

机载 CDP 探测数据时间分辨率为每秒一个数据。首先, 计算各通道的粒子数浓度和总数浓度。通过 CDP 探头探测的不同通道的粒子个数, 除对应通道的采样体积, 可得到该通道的粒子数浓度, 所有通道的粒子数浓度之和为粒子的总数浓度。其中, 通道的采样体积为采样面积乘以真空速及采样时间得到, 采样面积为 $0.25\ \text{mm}^2$, 采样时间为 $1\ \text{s}$, 真空速由机载 AIMMS 探测得到。

其次, 计算粒子有效直径。通过得到的所有通道的粒子数浓度, 结合对应通道的粒子平均直径, 计算粒子有效直径 (D_e)。具体公式如下:

$$D_e = \frac{\sum_{i=1}^m c_i d_i^3}{\sum_{i=1}^m c_i d_i^2} \quad (1)$$

式中, c_i 为 i 通道的粒子数浓度, d_i 为 i 通道的平均直径, m 为总的粒子通道数。

通过以上计算, 最终得到飞机飞行轨迹上的粒子有效半径, 以及对应的 AIMMS 探测的飞行时间、经纬度、高度、温度等数据。

3 云粒子有效半径(r_e)反演算法

r_e 可通过卫星在 $3.7\ \mu\text{m}$ 波段测得的辐射量反演获得。在已有反演方法 (Rosenfeld 和 Lensky, 1998) 的基础上, 改进厚云检测方案, 订正 $11\ \mu\text{m}$

和 $12\text{ }\mu\text{m}$ 通道亮温差 (BTD), 改进反射和发射辐射透过率计算方法, 发展了 r_e 反演算法。反演流程

如图 1 所示。

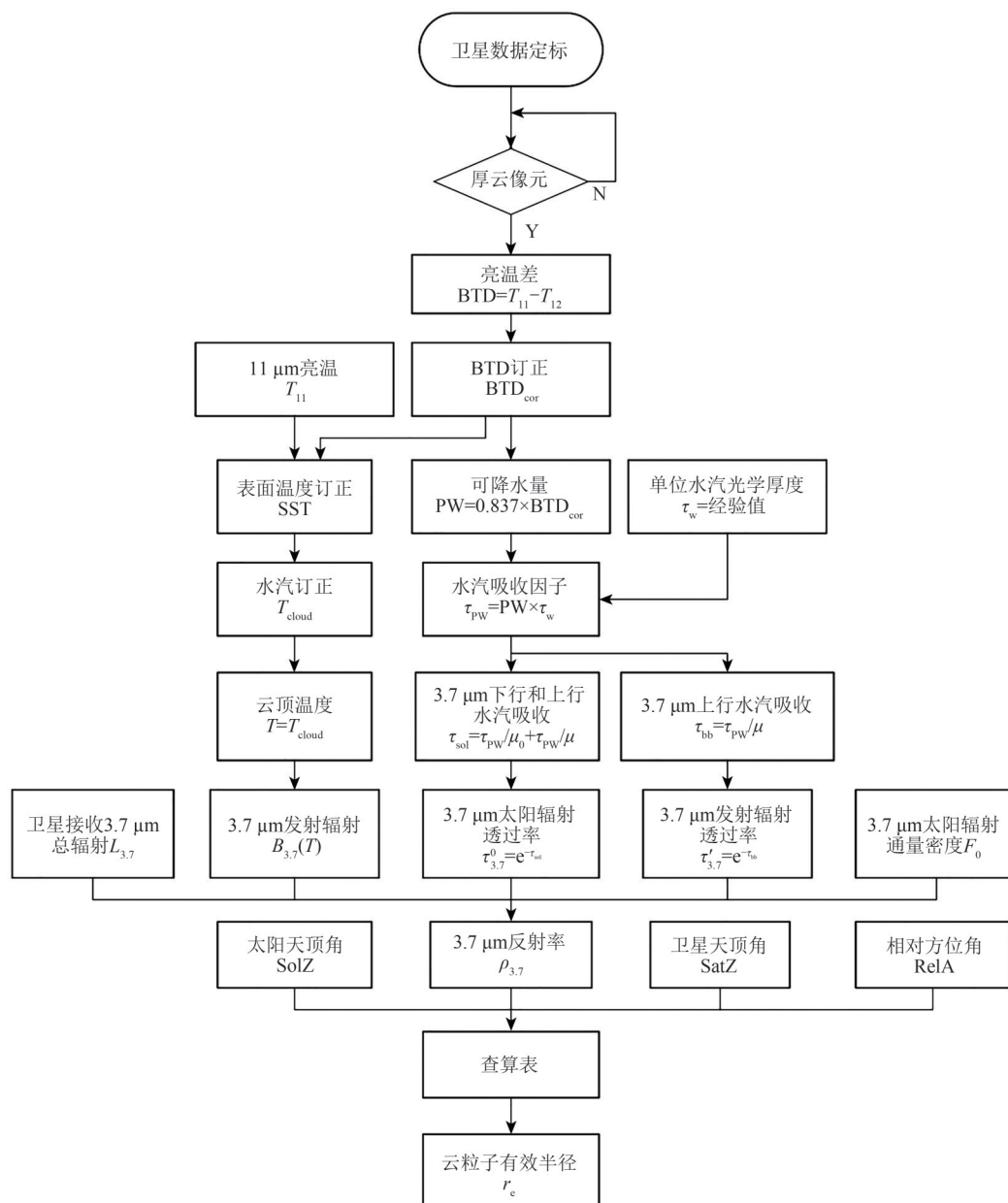


图 1 云粒子有效半径反演算法流程图(μ_0 和 μ 分别为太阳和卫星天顶角的余弦)

Fig. 1 Flowchart of retrieval algorithm for cloud particle effective radius (μ_0 and μ are the cosine of solar and satellite zenith angles, respectively)

由于地面辐射可能穿透薄云而使反演结果失真, 首先进行厚云检测, 剔除薄云, 仅保留厚云像元作为研究对象。具体做法: 利用辐射传输模式, 计算不同地表(陆面或海面)反射率、太阳天顶角(SolZ)、卫星天顶角(SatZ)和太阳与卫星相对方位角(RelA)组合条件下厚云(云的光学厚度为10)在 $0.64\text{ }\mu\text{m}$ 通道的最小反射率($\rho_{0.6_min}$), 建立厚云的可见光反射率查算表。通过

每个像元的SolZ、SatZ、RelA和下垫面类型, 可在查算表中得到像元的 $\rho_{0.6_min}$ 。如果像元的 $0.64\text{ }\mu\text{m}$ 通道可见光反射率($\rho_{0.6}$) $>\rho_{0.6_min}$, 就被识别为厚云像元。这个云检测方案是对以前方案的重要改进。以前的云检测方案仅仅简单使用 $\rho_{0.6}>0.4$ 的阈值, 会引入高反射地表(如沙漠等裸露地表)上的薄云或过度剔除低反射表面(如海洋和湖泊)上空的云像元。改进后的方法与太阳、卫星的角度等

有关, 物理意义更为合理。

识别为厚云的像元中可能存在上层为薄云的多层云, 这些像元的辐射亮温不能真实反映云顶信息, 可通过 11 μm 和 12 μm 通道 BTD 的动态阈值剔除这些多层云像元。经过 BTD 订正, 得到 BTD_{cor} 。再根据计算的 3.7 μm 通道反射率 ($\rho_{3.7}$), 反演得到 $r_{e,0}$ 。 $\rho_{3.7}$ 计算公式如下:

$$\rho_{3.7} = \frac{L_{3.7} - t'_{3.7} B_{3.7}(T)}{(t_{3.7}^0 F_0 \mu_0 / \pi) - [t'_{3.7} B_{3.7}(T)]} \quad (2)$$

式中, $L_{3.7}$ 为在 3.7 μm 通道的总辐射, 由卫星 3.7 μm 通道测量获得, 包括反射辐射和发射辐射两部分; $t_{3.7}^0$ 为 3.7 μm 通道太阳辐射下行和上行的总透过率, $t'_{3.7}$ 为 3.7 μm 通道云发射辐射的上行透过率, 其值取决于云上部水汽 (可降水量, PW) 的大小; F_0 为 3.7 μm 通道太阳辐射通量密度; μ_0 为太阳天顶角的余弦; 对 11 μm 通道辐射亮温经水汽订正计算得到云顶温度 (T), $B_{3.7}(T)$ 为温度 T 、波长 3.7 μm 的普朗克函数 (3.7 μm 的发射辐射)。

改进了反射和发射辐射透过率计算方法。水汽在 3.7 μm 通道具有较强的吸收, 反演时须考虑水汽吸收的影响。具体方法为: 反射辐射为太阳光投射至观测点并反射到卫星, 包括下行和上行路径, 发射辐射路径为观测点至卫星的上行路径, 反射辐射水汽吸收因子 (τ_{sol}) 和发射辐射水汽吸收因子 (τ_{bb}) 的计算公式如下:

$$\tau_{\text{sol}} = \tau_{\text{PW}} / \mu_0 + \tau_{\text{PW}} / \mu \quad (3)$$

$$\tau_{\text{bb}} = \tau_{\text{PW}} / \mu \quad (4)$$

式中, τ_{PW} 为水汽吸收因子, μ 为卫星天顶角的余弦。 τ_{PW} 可由云顶到大气顶部的可降水量 (PW) 与单位水汽光学厚度 (τ_w) 的乘积得到, PW 为 0.837 与 BTD_{cor} 的乘积, τ_w 为经验值, 从而得到 τ_{sol} 和 τ_{bb} 。

反射辐射透过率 $t_{3.7}^0$ 和发射辐射透过率 $t'_{3.7}$ 分别为 τ_{sol} 和 τ_{bb} 取负值的自然对数。将经改进计算的 $t_{3.7}^0$ 和 $t'_{3.7}$ 的值代入式 (2), 最终计算得到 $\rho_{3.7}$ 。

利用辐射传输模式 (Nakajima 和 King, 1990), 建立 r_e 与 $\rho_{3.7}$ 、SolZ、SatZ、RelA 关系的查算表。利用计算得到的 $\rho_{3.7}$ 和卫星提供的 SolZ、SatZ、RelA 等数据查找查算表, 经插值计算得到 $r_{e,0}$ 。

4 卫星反演 r_e 与飞机探测对比分析

定义利用本文算法通过 MODIS 和 AVHRR 载荷 3.7 μm 通道反演的云粒子有效半径为 $r_{e,0}$ 、MODIS 云产品 3.7 μm 通道云粒子有效半径为 $r_{e,p}$ 。对飞机

云物理探测数据与卫星观测数据进行时、空匹配, 限定卫星过境时间和飞机探测的时间差在 15 min 以内。为了获取更多的可对比个例, 使用 Terra、Aqua 和 NOAA 卫星观测数据, 通过与 2009 年 8—9 月和 2010 年 9—10 月的飞机探测数据匹配, 得到不同探测日期下共计 22 个可对比的个例 (MODIS 个例 15 个、AVHRR 个例 7 个)。利用 MODIS 和 AVHRR 的 3.7 μm 通道观测数据, 使用同一算法反演云粒子有效半径。在此基础上, 对 $r_{e,0}$ 、 $r_{e,p}$ 与机载 CDP 探测结果进行个例和统计对比分析, 以探讨 $r_{e,0}$ 反演算法的有效性和可靠性。

4.1 个例对比分析

基于卫星观测数据, 对飞机飞行轨迹或其附近区域云区的云顶温度 T 和云粒子有效半径 r_e 反演, 以获得该区域内云团云粒子有效半径随温度变化的 $T-r_e$ 廓线。图 2 为两个个例卫星过境时 MODIS 反演的真彩图和飞机观测路径上的 r_e 分布。考虑到云粒子有效半径包含有粒子谱特征信息, 无法进行统计意义上的平均, 采用了排序取中的方法, 即将区域内在同一温度上的所有云像元按照云粒子有效半径从小到大的顺序进行排序, 然后对样本数进行归一化处理, 以 5% 为间隔来确定样本数的百分比, 例如: 5% 对应于排在第 5% 位置的样本的云粒子有效半径; 10% 对应于第 10% 位置样本的云粒子有效半径; 以此类推, 一直到 100% 对应于云团中云粒子有效半径的最大值。用 50% 来表示该高度的总体情况, 在每隔 1 $^{\circ}\text{C}$ 的温度间隔内进行统计, 从而获得区域云团的 $T-r_e$ 廓线。按此方法, 对 $r_{e,0}$ 和飞机探测的有效半径数据做相同处理, 分别得到对应的 $T-r_e$ 廓线, 便于对比分析。

4.1.1 $r_{e,0}$ 和 $r_{e,p}$ 与飞机探测个例对比

$T-r_{e,0}$ 和 $T-r_{e,p}$ 与机载 CDP 探测结果的对比结果见图 3。可知 $r_{e,0}$ 和 $r_{e,p}$ 在第 30%、50% 和 70% 位置的值。其中, 30% 代表初生的云, 70% 代表相对成熟的云 (Lensky 和 Rosenfeld, 2006)。

由图 3 (a) 可见 $r_{e,0}$ 及其随高度的变化与飞机探测结果基本保持一致, 能够较为充分的反应有效半径随温度的分布特征。随温度 (高度) 的降低 (增加), 有效半径增大。在温度从 22 $^{\circ}\text{C}$ 降至较高高度的 5 $^{\circ}\text{C}$ 时, 云粒子有效半径变化范围 2—9 μm 。

与机载CDP探测结果的对比表明,两者在随温度的变化特征上保持一致,即从22℃到5℃的高度范围内,CDP的 r_e 变化范围3.5—10 μm ,与 r_{e_o} 大小分布基本一致。飞机探测的 r_e 在温度较暖的低层主要分布在第30%和50%的 r_{e_o} 之间,表示云粒子较

小,而在温度低于12℃的高度以上,飞机探测的 r_e 主要分布在第70%位置的 r_{e_o} 以上,表示云粒子较大。总体来看, r_{e_o} 与飞机探测的云粒子有效半径基本一致。

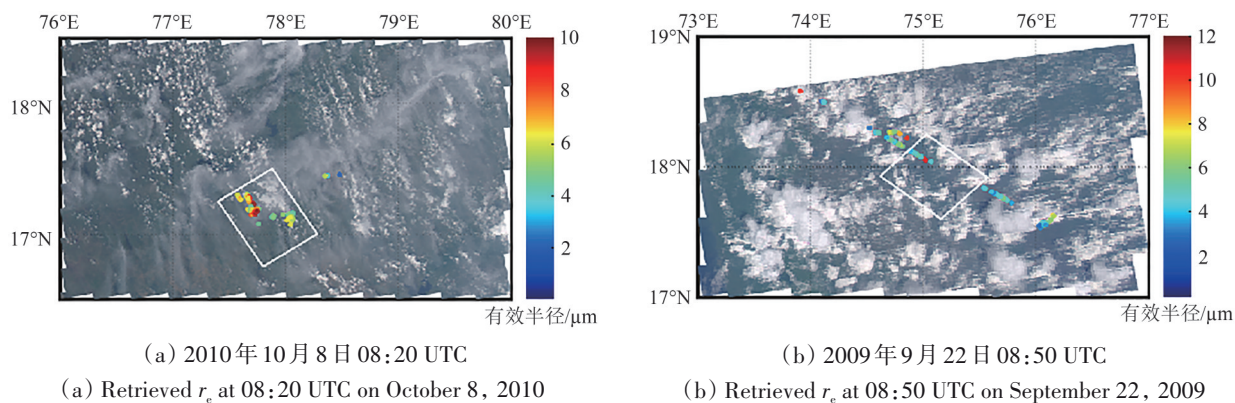


图2 MODIS真彩图和飞机探测路径上的 r_e 分布(白色方框区为 T - r_e 分析区域)

Fig.2 True-color image of MODIS and the distribution of r_e along flight route (The white box area indicates the T - r_e analysis area)

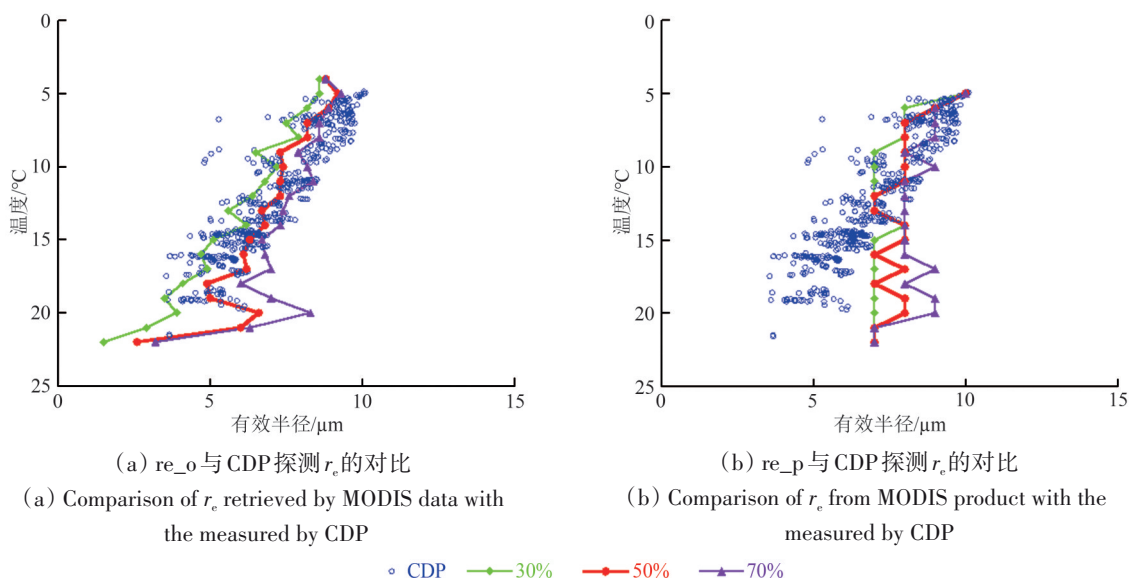


图3 2010年10月8日08:20 UTC卫星反演与CDP探测云粒子有效半径随温度的分布(绿色、红色、紫色线分别表示30%、50%、70%的有效样本数下 r_e 随温度的分布,蓝色圆圈为CDP探测的 r_e 。图4同)

Fig. 3 Satellite-retrieved and CDP-measured distributions of cloud particle effective radius versus temperature at 08:20 UTC on October 8, 2010 (The curves in green, red and purple indicate the variations of r_e with temperature for 30%, 50% and 70% available samples, respectively, blue circle indicates r_e measured by CDP. The same in Fig. 4)

由图3(b)可见: T - r_{e_p} 分布与CDP探测结果在温度高于11℃的较低高度范围内存在较大差异,CDP测量的 r_e 随温度降低(高度增加)从4 μm 增大到8 μm 左右;而 r_{e_p} 在随高度增加时大小几乎没有变化,保持在7—9 μm 。尤其在温度高于15℃以上时, r_{e_p} 和CDP测量的 r_e 相差2—3 μm ,最小差异也在40%以上;当温度低于11℃时,两者的变

化趋于一致,大体上能反应 T - r_e 分布特征。

根据图3分析可以看出, r_{e_o} 随 T 的分布与飞机探测云粒子有效半径 r_e 的变化趋势、大小分布相当吻合,与此不同的是 r_{e_p} 与飞机探测结果在云较暖的高度上存在较大差异, r_{e_p} 存在高估现象。通过个例对比得出 r_{e_o} 与飞机探测 r_e 的一致性更高,表明了本文算法的可靠性,可以利用3.7 μm 通道反

演的云顶粒子有效半径与温度的关系确定云中微物理结构。同时,也表现出卫星观测数据在研究云微物理特性时的潜在优势,特别是在与飞机探测数据的对比中,卫星反演的结果表现出与飞机探测 r_e 较高的一致性,为进一步开展云物理研究提供了可靠的数据基础。

4.1.2 不同卫星天顶角个例的对比

卫星天顶角(SatZ)是指天顶线与卫星连线所在地点之间的夹角,当卫星在星下点时,卫星天顶角近似为0,而在边缘位置时卫星天顶角最大。2010年10月8日卫星天顶角为 26° 时 $3.7\ \mu\text{m}$ 通道反演的 $T-r_e$ 分布与飞机探测结果的对比情况见图3(a),分析表明 $r_{e,o}$ 与飞机探测结果一致,反演精度相对较高。

图4为2009年9月22日个例反演的 $T-r_e$ 分布与飞机探测结果的对比。可见:随温度的降低(高度增加), $r_{e,o}$ 和CDP探测的 r_e 均增大; $r_{e,o}$ 主要分布在飞机探测各温度层 r_e 的大值端。与2010年10月8日个例(图3(a))的结果比较,该个例 $r_{e,o}$ 和飞机探测结果的一致性相对较低。究其原因,该个例的卫星天顶角较大,达到 47° ,卫星观测位置相对较偏离,导致对 r_e 反演的精度产生影响。

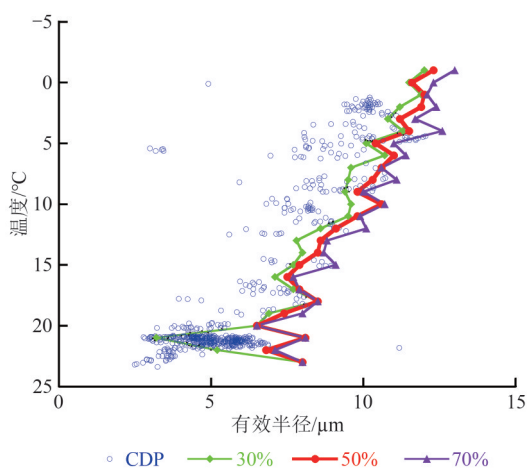


图4 2009年9月22日08:50 UTC $r_{e,o}$ 和CDP探测的云粒子有效半径随温度的分布

Fig.4 Temperature dependence of cloud particle effective radius derived from MODIS retrievals and CDP measurements at 08:50 UTC on September 22, 2009

图3(a)和图4个例分析表明,当卫星天顶角较大时,会导致 r_e 反演值的过估,因此在应用时需要选择较小的卫星天顶角,以确保反演精度

(Marshak等, 2006),这对于卫星观测数据的合理应用和解释非常重要。

4.2 $r_{e,o}$ 和 $r_{e,p}$ 与飞机探测结果对比分析

为进一步验证 r_e 反演算法的可靠性,对所有22个个例的 $r_{e,o}$ 、 $r_{e,p}$ 和飞机探测 r_e 进行相关性分析。图5为 $r_{e,o}$ 和 $r_{e,p}$ 与飞机探测云粒子有效半径的散点分布。

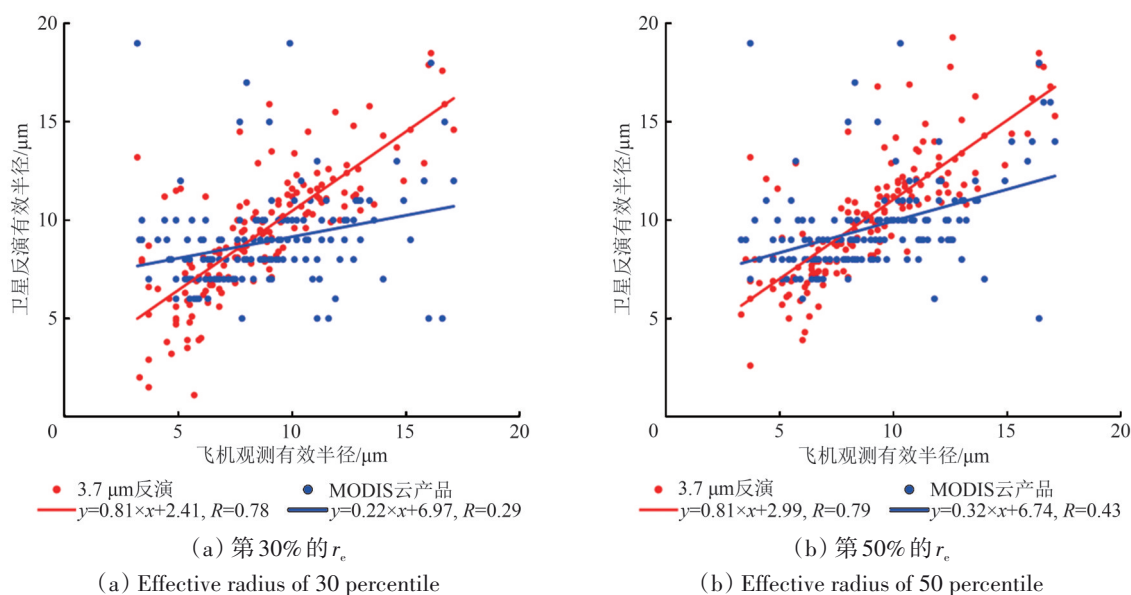
对于第30%位置的 r_e (图5(a)), $r_{e,o}$ 和飞机探测的 r_e 同步增大,大多数点分布在拟合线上或附近,主要聚集在 $5-14\ \mu\text{m}$;而在大于 $15\ \mu\text{m}$ 的大值端,点的分布相对较分散。与此相反, $r_{e,p}$ 与飞机探测 r_e 的对比显示出点的分布较为分散,且相关系数(R)为0.29,远小于 $r_{e,o}$ 与飞机探测 r_e 的相关系数0.78。这表明 $r_{e,o}$ 与飞机探测结果的相关性更好,有更高的线性拟合程度。

对于第50%位置的 r_e (图5(b)), $r_{e,o}$ 和飞机探测的对比结果与第30%位置 r_e 的对比结果相似,第50%的一致性更高。比较图5(a)和(b)可见,30%和50%的 $r_{e,o}$ 随飞机探测 r_e 的变化,其点的分布差异不大,线性拟合的斜率均为0.81,50%的 $r_{e,o}$ 略微偏大,相关系数分别为0.78和0.79,几乎相同。而第50%位置的 $r_{e,p}$ 与相应的飞机探测结果对比,相关性较差, R 为0.43,线性拟合程度也相对较低。

综上所述,22个个例的相关性统计分析进一步说明了 $r_{e,o}$ 与飞机探测结果之间的高相关性和一致性,证实了本文算法的可靠性。尤其是对于第30%和50%位置的 r_e 的对比分析,也进一步支持了本文算法的有效性。

4.3 卫星天顶角对 r_e 反演精度影响分析

粒子有效半径反演的误差源主要来自大气水汽吸收和长波热辐射的订正、地表反照率和有关云垂直结构及云滴大小分布形状的假设(Platnick和Valero, 1995; Bréon和Doutriaux-Boucher, 2005; Nakajima等, 2010)。卫星反演云参数误差源主要来自太阳/卫星的观测几何角度及其相关的三维辐射效应(Marshak等, 2006; Cornet等, 2005; Vant-Hull等, 2007; Kato和Marshak, 2009; Wang等, 2023),亚像元中晴空污染及其随卫星扫描角度的变化(Maddux等, 2010)。本文主要讨论卫星天顶角对 r_e 反演的影响。

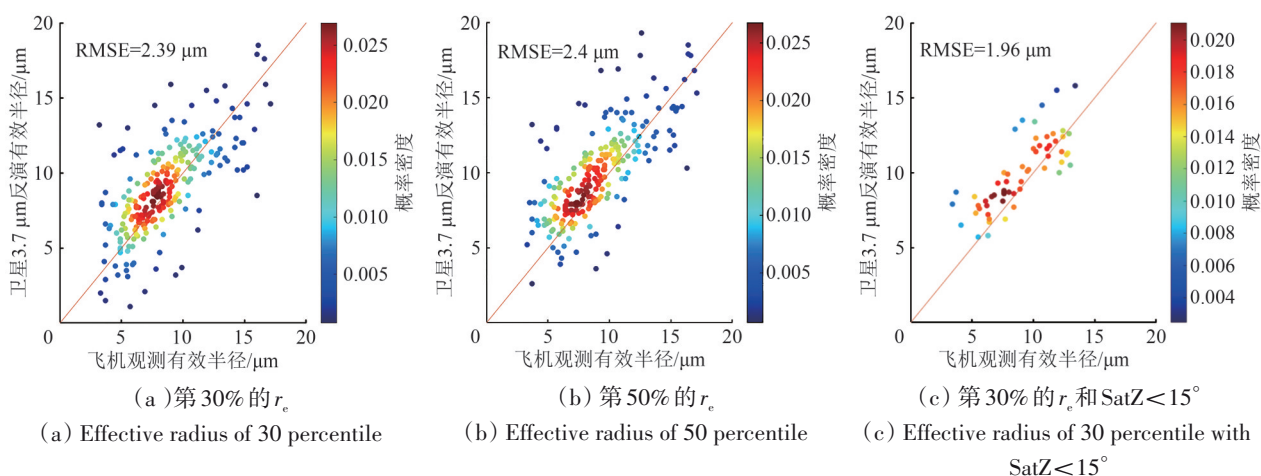
图5 $r_{e,s}$ 和 $r_{e,p}$ 与CDP探测云粒子有效半径的散点分布Fig. 5 Scatter plots of cloud particle effective radius from satellite retrievals ($r_{e,s}$), MODIS cloud products ($r_{e,p}$), and CDP measurements

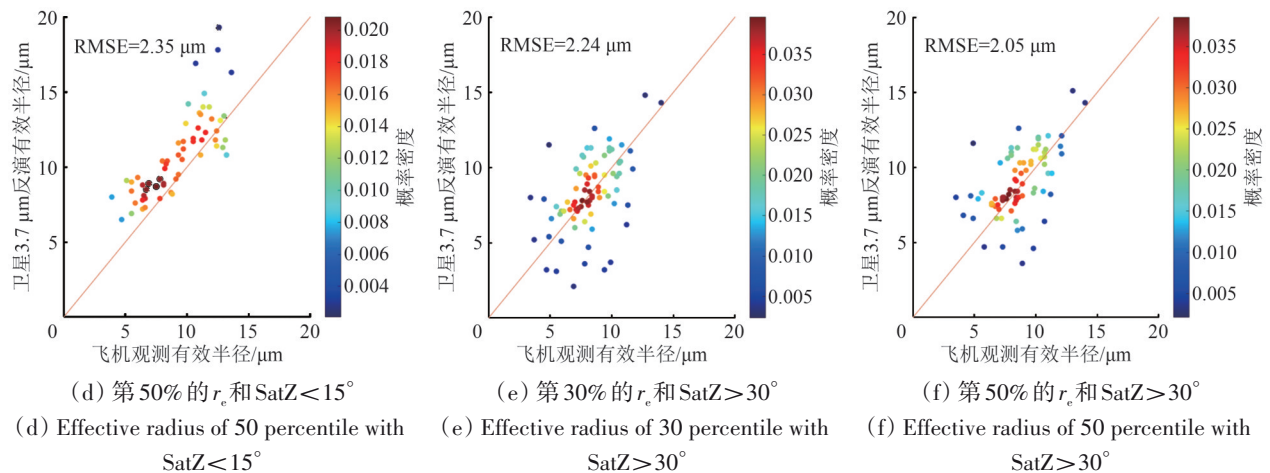
基于卫星和飞机探测的22个个例的 T - r_e 分布, 对 $r_{e,s}$ 与飞机探测结果对比, 统计分析反演误差。考虑到卫星天顶角对云粒子有效半径反演的影响, 将SatZ分为3种情况, 即: 不考虑SatZ大小, SatZ<15°, SatZ>30°, 选取第30%和50%位置的 $r_{e,s}$ 分析反演精度。图6为SatZ在3种情况下 $r_{e,s}$ 与飞机探测 r_e 对比的概率密度分布。

当不分SatZ大小时, 对于第30%位置的 r_e , 高密度区域接近1:1的比例, 高密度区的 r_e 分布范围6—10 μm (图6 (a)), 对于第50%位置的 r_e , 其高密度区域也接近1:1, 略偏向大值端 (图6 (b))。两者的均方根误差 (RMSE) 分别为2.39 μm和2.4 μm, 大小相当。这表明 $r_{e,s}$ 与飞机探

测结果具有较好的一致性, 且第30%和第50%的有效半径差异很小。

当SatZ<15°时, 对于第30%和50%位置的 r_e , 绝大部分点围绕在高密度区域1:1线附近, r_e 分布在6—12 μm (图6 (c)和(d)), 累计概率大, 反演值比飞机探测结果略微偏大, RMSE分别为1.96 μm和2.35 μm。当SatZ>30°时, 对于第30%和50%位置的 r_e , 高密度区域的 r_e 分布在7—9 μm (图6 (e)和(f)), 累计概率较小, RMSE值分别为2.24 μm和2.05 μm, 尽管其RMSE值与SatZ<15°时相当, 但非高密度区域点 (冷色点) 的分布较为分散, 和飞机探测结果相比, 会造成反演值过估。



图6 r_{e_o} 与CDP探测云粒子有效半径对比的概率密度分布Fig.6 Probability density distribution of cloud particle effective radius from satellite retrievals (r_{e_o}) and CDP measurements

本文算法充分考虑了水汽吸收和长波热辐射的订正, 以及地表反照率等因素对有效半径反演的影响, 通过可由 $11\ \mu\text{m}$ 和 $12\ \mu\text{m}$ 通道亮温差 BTD 计算得到的 PW、并且考虑光学厚度足够厚的云像元, 有效避免了水汽吸收和基于平行平面假设导致的亚像元以及地表反照率的影响。综合以上分析结果, 反演误差在 $2.4\ \mu\text{m}$ 以内, 这可能与反演计算时假设云在垂直方向上是均匀分布的单一云层有关。总体来看, 分析结果反映出 r_{e_o} 与飞机探测结果具有较好的一致性, 反演误差与以往对海洋性层积云卫星反演的 $2\ \mu\text{m}$ 左右的误差接近, 表明了本文算法的可靠性, 可作为一种有效的工具来获取云粒子有效半径信息。同时, 研究也表明了卫星天顶角对 r_e 反演的影响。因此, 在应用卫星反演有效半径数据时, 应特别注意卫星观测的位置和天顶角, 避免过大的天顶角, 以确保反演的云粒子有效半径的精度, 这一点对于在不同气象研究和应用中准确获取云粒子有效半径信息至关重要。

5 结 论

为验证改进的 $3.7\ \mu\text{m}$ 通道云粒子有效半径反演算法的可靠性和准确性, 利用本文算法反演结果和 MODIS 产品的云粒子有效半径, 结合 22 架次飞机实测数据, 对比分析了卫星反演和实测云粒子有效半径的差异。主要结论如下:

(1) 个例 $T-r_e$ 廓线分析表明, 本文算法的反演结果与飞机实测云粒子有效半径的垂直分布特征

一致。相比之下, MODIS 产品 (r_{e_p}) 在云层暖区表现出高估现象。

(2) 与飞机探测结果的相关性分析表明, 本文算法与飞机探测的相关系数达 0.79, 线性拟合斜率为 0.81, 显著优于 MODIS 产品的 0.43 相关性和 0.32 斜率。这表明本文算法能更准确的反映云微物理特征的真实空间分布。

(3) 误差分析显示本文算法的误差保持在 $2.4\ \mu\text{m}$ 以内, 反映出较高的反演精度。也揭示了卫星天顶角对有效半径反演精度的影响, 特别是当卫星天顶角较大时, 可能导致云粒子有效半径的过估。提示在实际应用中, 需要特别注意卫星的观测位置和天顶角, 以确保反演结果的准确性。

随着卫星技术的不断发展, 对云粒子有效半径反演精度也提出了更高的要求。本研究主要集中在对垂直分布均匀的水云的云顶粒子有效半径反演, 未来还需要进一步研究冰云粒子有效半径的反演, 以提高卫星在天气、气候、人工影响天气和环境等领域的应用水平。

参考文献 (References)

- Ackerman S A, Moeller C C, Strabala K I, Gerber H E, Gumley L E, Menzel W P and Tsay S C. 1998. Retrieval of effective microphysical properties of clouds: a wave cloud case study. *Geophysical Research Letters*, 25(8): 1121-1124 [DOI: 10.1029/98GL00042]
- Baum B A, Frey R A, Mace G G, Harkey M K and Yang P. 2003. Nighttime multilayered cloud detection using MODIS and ARM Data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 42(7): 905-919 [DOI: 10.1175/1520-0450(2003)042<0905:NMCDUM>

- 2.0.CO;2]
- Bréon F M and Doutriaux-Boucher M. 2005. A comparison of cloud droplet radii measured from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(8): 1796-1805 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.852838]
- Chen Y Y, Xiong S Q, Zhou Y Q, Zhu B and Mao J T. 2013. Research on effective particle radius of water clouds retrieved from the data of FY-3A three channels. *Meteorological Monthly*, 39(4): 478-485 (陈英英, 熊守权, 周毓荃, 朱冰, 毛节泰. 2013. FY-3A 三个通道资料反演水云有效粒子半径的研究. *气象*, 39(4): 478-485) [DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.010]
- Cornet C, Buriez J C, Riédi J, Isaka H and Guillemet B. 2005. Case study of inhomogeneous cloud parameter retrieval from MODIS data. *Geophysical Research Letters*, 32(13): L13807 [DOI: 10.1029/2005GL022791]
- Dai J, Yu X, Liu G H, Xu X H and Yue Z G. 2010. Analyses of satellite retrieval microphysical properties of a rainstorm in the northern part of Shaanxi. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(3): 387-397 (戴进, 余兴, 刘贵华, 徐小红, 岳治国. 2010. 一次暴雨过程中云微物理特征的卫星反演分析. *气象学报*, 68(3): 387-397) [DOI: 10.11676/qxxb2010.038]
- Dai J, Yu X, Liu G H, Xu X H, Yue Z G, Sun W and Yang F Z. 2011. Satellite retrieval analysis on microphysical property of thunderstorm with light precipitation over the Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 30(2): 288-298 (戴进, 余兴, 刘贵华, 徐小红, 岳治国, 孙伟, 杨馥祯. 2011. 青藏高原雷暴弱降水云微物理特征的卫星反演分析. *高原气象*, 30(2): 288-298)
- Freud E, Rosenfeld D and Kulkarni J R. 2011. Resolving both entrainment-mixing and number of activated CCN in deep convective clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(24): 12887-12900 [DOI: 10.5194/acp-11-12887-2011]
- Fu Y F. 2014. Cloud parameters retrieved by the bispectral reflectance algorithm and associated applications. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(5): 1039-1053 (傅云飞. 2014. 利用卫星双光谱反射率算法反演的云参数及其应用. *气象学报*, 72(5): 1039-1053) [DOI: 10.11676/qxxb2014.087]
- Han Q Y, Rossow W B and Lacis A A. 1994. Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data. *Journal of Climate*, 7(4): 465-497 [DOI: 10.1175/1520-0442(1994)007<0465:NGSOED>2.0.CO;2]
- Kato S and Marshak A. 2009. Solar zenith and viewing geometry-dependent errors in satellite retrieved cloud optical thickness: marine stratocumulus case. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D1): D01202 [DOI: 10.1029/2008JD010579]
- King M D, Kaufman Y J, Menzel W P and Tanré D. 1992. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(1): 2-27 [DOI: 10.1109/36.124212]
- Kokhanovsky A A, Painemal D and Rozanov V V. 2013. The intercomparison of satellite-derived and in situ profiles of droplet effective radii in marine stratocumulus clouds. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(5): 1147-1151 [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2233710]
- Kulkarni J R, Maheskumar R S, Morwal S B, Padma Kumari B, Konwar M, Deshpande C G, Joshi R R, Bhalwankar R V, Pandithurai G, Safai P D, Narkhedkar S G, Dani K K, Nath A, Nair S, Sapre V V, Puranik P V, Kandalgaonkar S S, Mujumdar V R, Khaladkar R M, Vijayakumar R, Prabha T V and Goswami B N. 2012. The cloud aerosol interaction and precipitation enhancement experiment (CAIPEEX): overview and preliminary results. *Current Science Association*, 102(3): 413-425
- Lensky I M and Rosenfeld D. 2006. The time-space exchangeability of satellite retrieved relations between cloud top temperature and particle effective radius. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(10): 2887-2894 [DOI: 10.5194/acp-6-2887-2006]
- Li D J, Zhao C F, Yue Z G, Liu C, Sun Y W and Cohen J B. 2022. Response of cloud and precipitation properties to seeding at a supercooled cloud-top layer. *Earth and Space Science*, 9(9): e2021EA001791 [DOI: 10.1029/2021EA001791]
- Liu G H, Yu X, Dai J, Xu X H and Yue Z G. 2011a. A case study of the conditions for topographic cloud seeding based on the retrieval of satellite measurements. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(2): 363-369 (刘贵华, 余兴, 戴进, 徐小红, 岳治国. 2011a. 地形云人工增雨条件卫星探测反演个例分析. *气象学报*, 69(2): 363-369) [DOI: 10.11676/qxxb2011.031]
- Liu G H, Yu X, Shi C X and Dai J. 2011b. Comparisons of microphysical property of cloud retrieved from FY-3A/VIRR and TERRA/MODIS. *Plateau Meteorology*, 30(2): 461-470 (刘贵华, 余兴, 师春香, 戴进. 2011b. FY-3A/VIRR 反演云微物理特征及与 TERRA/MODIS 反演结果的比较. *高原气象*, 30(2): 461-470)
- Liu J. 2015. Retrieval bias analysis of ice cloud optical thickness based on the FY-2 satellite. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(6): 1121-1130 (刘健. 2015. 风云二号卫星的冰云光学厚度反演偏差分析. *气象学报*, 73(6): 1121-1130) [DOI: 10.11676/qxxb2015.076]
- Liu J, Dong C H and Zhang W J. 2003. Determination of the optical thickness and effective radius of water clouds by FY-1C data. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 22(6): 436-440 (刘健, 董超华, 张文建. 2003. 利用FY-1C资料反演水云的光学厚度和粒子有效半径. *红外与毫米波学报*, 22(6): 436-440) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-9014.2003.06.009]
- Maddux B C, Ackerman S A and Platnick S. 2010. Viewing geometry dependencies in MODIS cloud products. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(9): 1519-1528 [DOI: 10.1175/2010JTECHA1432.1]
- Marshak A, Platnick S, Várnai T, Wen G Y and Cahalan R F. 2006. Impact of three-dimensional radiative effects on satellite retrievals of cloud droplet sizes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D9): D09207 [DOI: 10.1029/2005JD006686]
- Min Q, Joseph E, Lin Y, Min L, Yin B, Daum P H, Kleinman L I, Wang J and Lee Y N. 2012. Comparison of MODIS cloud microphysical properties with in-situ measurements over the Southeast

- Pacific. Atmospheric Chemistry and Physics, 12(23): 11261-11273 [DOI: 10.5194/acp-12-11261-2012]
- Minnis P, Heck P W, Young D F, Fairall C W and Snider J B. 1992. Stratocumulus cloud properties derived from simultaneous satellite and island-based instrumentation during FIRE. *Journal of Applied Meteorology*, 31(4): 317-339 [DOI: 10.1175/1520-0450(1992)031<0317:scpdfs>2.0.co;2]
- Nair S, Sanjay J, Pandithurai G, Maheskumar R S and Kulkarni J R. 2012. On the parameterization of cloud droplet effective radius using CAIPEEX aircraft observations for warm clouds in India. *Atmospheric Research*, 108: 104-114 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.02.002]
- Nakajima T and 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 the Atmospheric Sciences*, 47(15): 1878-1893 [DOI: 10.1175/1520-0469(1990)047<1878:DOTOTA>2.0.CO;2]
- Nakajima T, King M D, Spinhirne J D and Radke L F. 1991. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part II: marine stratocumulus observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48(5): 728-751 [DOI: 10.1175/1520-0469(1991)048<0728:DOTOTA>2.0.CO;2]
- Nakajima T Y and Nakajima T. 1995. Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(23): 4043-4059 [DOI: 10.1175/1520-0469(1995)052<4043:WADOCM>2.0.CO;2]
- Nakajima T Y, Suzuki K and Stephens G L. 2010. Droplet growth in warm water clouds observed by the A-Train. Part I: sensitivity analysis of the MODIS-derived cloud droplet sizes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(6): 1884-1896 [DOI: 10.1175/2009JAS3280.1]
- Padmakumari B, Maheskumar R S, Harikishan G, Kulkarni J R and Goswami B N. 2013. Comparative study of aircraft- and satellite-derived aerosol and cloud microphysical parameters during CAIPEEX-2009 over the Indian region. *International Journal of Remote Sensing*, 34(1): 358-373 [DOI: 10.1080/01431161.2012.705442]
- Painemal D and Zuidema P. 2011. Assessment of MODIS cloud effective radius and optical thickness retrievals over the Southeast Pacific with VOCALS-REx in situ measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D24): D24206 [DOI: 10.1029/2011JD016155]
- Platnick S. 2000. Vertical photon transport in cloud remote sensing problems. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105 (D18): 22919-22935 [DOI: 10.1029/2000JD900333]
- Platnick S, King M D, Ackerman S A, Menzel W P, Baum B A, Riedi J C and Frey R A. 2003. The MODIS cloud products: algorithms and examples from Terra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 459-473 [DOI: 10.1109/tgrs.2002.808301]
- Platnick S and Valero F P J. 1995. A validation of a satellite cloud retrieval during ASTEX. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52 (16): 2985-3001 [DOI: 10.1175/1520-0469(1995)052<2985:AVO-ASC>2.0.CO;2]
- Roebeling R, Baum B, Bennartz R, Hamann U, Heidinger A, Thoss A and Walther A. 2013. Evaluating and improving cloud parameter retrievals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94 (4): ES41-ES44 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00041.1]
- Rolland P, Liou K N, King M D, Tsay S C and McFarquhar G M. 2000. Remote sensing of optical and microphysical properties of cirrus clouds using moderate-resolution imaging spectroradiometer channels: methodology and sensitivity to physical assumptions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D9): 11721-11738 [DOI: 10.1029/2000JD900028]
- Rosenfeld D, Cattani E, Melani S and Levizzani V. 2004. Considerations on daylight operation of 1.6-versus 3.7- μm channel on NOAA and METOP satellites. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(6): 873-881 [DOI: 10.1175/BAMS-85-6-873]
- Rosenfeld D and Lensky I M. 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (11): 2457-2476 [DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<2457:SBI-IPF>2.0.CO;2]
- Rosenfeld D, Yu X and Dai J. 2005. Satellite-Retrieved microstructure of AgI seeding tracks in supercooled layer clouds. *Journal of Applied Meteorology*, 44(6): 760-767 [DOI: 10.1175/JAM2225.1]
- Rosenfeld D, Zhu Y N, Wang M H, Zheng Y T, Goren T and Yu S C. 2019. Aerosol-driven droplet concentrations dominate coverage and water of oceanic low-level clouds. *Science*, 363(6427): eaav0566 [DOI: 10.1126/science.aav0566]
- Rossow W B and Garder L C. 1993. Cloud detection using satellite measurements of infrared and visible radiances for ISCCP. *Journal of Climate*, 6(12): 2341-2369 [DOI: 10.1175/1520-0442(1993)006<2341:CDUSMO>2.0.CO;2]
- Shang H Z, Husi L T, Li M, Tao J H and Chen L F. 2022. Remote sensing of cloud properties based on visible-to-infrared channel observation from passive remote sensing satellites. *Acta Optica Sinica*, 42(6): 0600003 (尚华哲, 胡斯勒图, 李明, 陶金花, 陈良富. 2022. 基于被动遥感卫星可见至红外通道观测的云特性遥感. *光学学报*, 42(6): 0600003) [DOI: 10.3788/AOS202242.0600003]
- Stone R S, Stephens G L, Platt C M R and Banks S. 1990. The remote sensing of thin cirrus cloud using satellites, lidar and radiative transfer theory. *Journal of Applied Meteorology*, 29(5): 353-366 [DOI: 10.1175/1520-0450(1990)029<0353:TRSOTC>2.0.CO;2]
- Twomey S and Cocks T. 1989. Remote sensing of cloud parameters from spectral reflectance in the near-infrared. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 62(3): 172-179
- Twomey S and Seton K J. 1980. Inferences of gross microphysical properties of clouds from spectral reflectance measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(5): 1065-1069 [DOI: 10.

- 1175/1520-0469(1980)037<1065:IOGMPO>2.0.CO;2]
- Vant-Hull B, Marshak A, Remer L A and Li Z Q. 2007. The effects of scattering angle and cumulus cloud geometry on satellite retrievals of cloud droplet effective radius. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4): 1039-1045 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.890416]
- Wang Y C, Zhu Y N, Wang M H, Rosenfeld D, Gao Y, Yao X H, Sheng L F, Efraim A and Wang J T. 2021. Validation of satellite-retrieved CCN based on a cruise campaign over the polluted Northwestern Pacific ocean. *Atmospheric Research*, 260: 105722 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105722]
- Wang Y T, Shang H Z, Letu H, Wei L S, Chen F N, Hong J, Wang Z T and Chen L F. 2023. Impact of orbital characteristics and viewing geometry on the retrieval of cloud properties from multiangle polarimetric measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 4107617 [DOI: 10.1109/TGRS. 2023. 3329305]
- Wylie D, Jackson D L, Menzel W P and Bates J J. 2005. Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations. *Journal of Climate*, 18(15): 3021-3031 [DOI: 10.1175/JCLI3461.1]
- Xin L and Yao Z Y. 2011. Studies on the microphysical characteristics of an aircraft seeding in convective line with trailing stratiform cloud. *Meteorological Monthly*, 37(2): 194-202 (辛乐, 姚展予. 2011. 一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析. *气象*, 37(2): 194-202) [DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2011. 2.009]
- Xu X H, Yu X, Liu G H, Yue Z G and Zhu Y N. 2022. Early identification and automatic warning of hail clouds by satellite. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 46(1): 98-110 (徐小红, 余兴, 刘贵华, 岳治国, 朱延年. 2022. 冰雹云卫星早期识别与自动预警. *大气科学*, 46(1): 98-110) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2104. 21010]
- Xu X H, Yu X, Zhu Y N, Liu G H and Dai J. 2018. Cloud microphysical properties of a tornado revealed by FY-2G geostationary satellite. *Plateau Meteorology*, 37(6): 1737-1748 (徐小红, 余兴, 朱延年, 刘贵华, 戴进. 2018. 6·23 龙卷 FY-2G 卫星云微物理特征分析. *高原气象*, 37(6): 1737-1748) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00041]
- Xu X H, Yu X, Zhu Y N, Liu G H, Dai J and Yue Z G. 2012a. Seeding condition of precipitation enhancement revealed by multiple spectral data of satellite. I: convective clouds. *Climatic and Environmental Research*, 17(6): 747-757 (徐小红, 余兴, 朱延年, 刘贵华, 戴进, 岳治国. 2012a. 卫星遥感人工增雨作业条件I: 对流云. *气候与环境研究*, 17(6): 747-757) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585. 2012.06.12]
- Xu X H, Yu X, Zhu Y N, Liu G H, Dai J and Yue Z G. 2012b. Analysis on satellite retrieval of cloud structure in a severe squall line process. *Plateau Meteorology*, 31(1): 258-268 (徐小红, 余兴, 朱延年, 刘贵华, 戴进, 岳治国. 2012b. 一次强飑线云结构特征的卫星反演分析. *高原气象*, 31(1): 258-268)
- Ye J, Li W B and Yan W. 2009. Retrieval of the optical thickness and effective radius of multilayered cloud using MODIS data. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(4): 613-622 (叶晶, 李万彪, 严卫. 2009. 利用MODIS数据反演多层云光学厚度和有效粒子半径. *气象学报*, 67(4): 613-622) [DOI: 10.11676/qxxb2009.061]
- Yue Z G, Yu X, Liu G H, Dai J, Zhu Y N, Xu X H, Hui Y and Chen C. 2018. NPP/VIIRS satellite retrieval of summer convective cloud microphysical properties over the Tibetan Plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(6): 968-982 (岳治国, 余兴, 刘贵华, 戴进, 朱延年, 徐小红, 惠英, 陈闯. 2018. NPP/VIIRS 卫星反演青藏高原夏季对流云微物理特征. *气象学报*, 76(6): 968-982) [DOI: 10.11676/qxxb2018.051]
- Zeng S, Parol F, Riedi J, Cornet C and Thieuleux F. 2011. Examination of POLDER/PARASOL and MODIS/Aqua cloud fractions and properties representativeness. *Journal of Climate*, 24(16): 4435-4450 [DOI: 10.1175/2011JCLI3857.1]
- Zhang Z B, Ackerman A S, Feingold G, Platnick S, Pincus R and Xue H W. 2012. Effects of cloud horizontal inhomogeneity and drizzle on remote sensing of cloud droplet effective radius: case studies based on large-eddy simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D19s): D19208 [DOI: 10.1029/2012JD017655]
- Zhao F S, Ding Q, Sun T M, Kong Q X, Hu W, Xun S P and Shao H F. 2002. An iterative algorithm for the retrieval of cloud properties from NOAA-AVHRR imagery. *Acta Meteorologica Sinica*, 60(5): 594-601 (赵凤生, 丁强, 孙同明, 孔庆欣, 胡雯, 荀尚培, 邵鸿飞. 2002. 利用NOAA-AVHRR观测数据反演云辐射特性的一种迭代方法. *气象学报*, 60(5): 594-601) [DOI: 10.11676/qxxb2002.070]
- Zhou Q, Zhao F S and Gao W H. 2010. Retrieval of cloud radiative properties from FY-2C satellite data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 34(4): 827-842 (周青, 赵凤生, 高文华. 2010. 利用FY-2C卫星数据反演云辐射特性. *大气科学*, 34(4): 827-842) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.14]
- Zhou Y Q, Chen Y Y, Li J, Huang Y M, He X D, Zhou F F, Wu M X, Hu B and Mao J T. 2008. Retrieval and preliminary test of cloud physical parameters from combination of FY-2C/D geostationary satellite data and other observation data. *Meteorological Monthly*, 34(12): 27-35 (周毓荃, 陈英英, 李娟, 黄毅梅, 何小东, 周非非, 吴门新, 胡波, 毛节泰. 2008. 用FY-2C/D卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验. *气象*, 34(12): 27-35) [DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2008.12.004]
- Zhu Y N, Rosenfeld D and Li Z Q. 2018. Under what conditions can we trust retrieved cloud drop concentrations in broken marine stratocumulus? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (16): 8754-8767 [DOI: 10.1029/2017JD028083]
- Zhu Y N, Rosenfeld D, Yu X, Liu G H, Dai J and Xu X H. 2014. Satellite retrieval of convective cloud base temperature based on the NPP/VIIRS Imager. *Geophysical Research Letters*, 41(4): 1308-1313 [DOI: 10.1002/2013GL058970]

Comparative verification of cloud particle effective radius at cloud top by satellite retrieval and airborne measurement

XU Xiaohong^{1,2}, LIU Guihua¹, DAI Jin¹, YUE Zhiguo^{3,2}

1. Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710016, China;

2. Key Open Laboratory of Eco-Environment Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, China Meteorological Administration, Xi'an 710016, China;

3. Center of Weather Modification of Shaanxi Province, Xi'an 710016, China

Abstract: The retrieval of cloud particle effective radius (r_e) from satellite remote sensing is a critical technique for studying cloud microphysical properties and precipitation processes. It has significant applications in aerosol-cloud interactions, severe convective weather monitoring and early warning, and weather modification. Accuracy validation of the retrieved r_e is essential for these applications.

Based on improved satellite retrieval algorithm for cloud particle effective radius using 3.7 μm channel data, this study derives cloud particle effective radius (r_{e_o}) from MODIS and AVHRR observations. The retrieved r_{e_o} are systematically compared with in-situ r_e measurements by aircraft from 22 cases of continental cumulus cloud, and the algorithm's reliability and accuracy is evaluated.

The comparisons show that the error of particle effective radius between the retrieval and airborne measurements is less than 2.4 μm , which is very close to 2 μm of international verification results within marine stratus. The distribution of r_e with temperature/height (vertical structure) is quite consistent with that detected by aircraft measurement. The retrieved r_e from the 3.7 μm has a high correlation with the airborne measurement, with a correlation coefficient of 0.79 and a linear fitting slope of 0.81. However, the r_e from MODIS cloud product has a low correlation with the airborne measurement, and the correlation coefficient and linear fitting slope are 0.43 and 0.32, respectively. All these results suggest high accuracy of the retrieved particle effective radius of clouds and the high reliability of the retrieved methodologies which demonstrate that improved algorithm can provide a reliable data foundation for applications.

Key words: remote sensing, cloud particle effective radius, vertical structure, satellite retrieval, aircraft measurements, validation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42275085); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No. 2024JC-YBMS-228)