

云雷达与 FY-4B 融合反演云顶高度方法研究*

胡树贞^{1,2,3} 陶法^{1,2,3} 张雪芬^{1,2,3} 王超杰⁴ 王志成¹ 茆佳佳^{1,2,3}

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 临近空间环境特性及效应全国重点实验室, 北京 100081

3 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081

4 河南省气象服务中心, 郑州 450003

提 要: 利用 FY-4B 反演云顶温度和自动气象站气温得到星地温度差, 联合云雷达观测云顶高度, 计算星地垂直温度平均递减率 (SG-VMTR), 并与探空温度廓线拟合得到的垂直温度递减率 (γ) 进行对比分析。同时将 SG-VMTR 应用在邻近的其他卫星像元, 实现了云雷达周边区域卫星云顶高度的融合反演, 并对反演结果进行验证分析。结果表明, 同站点的 SG-VMTR 与 γ 接近且具有较为一致的变化趋势, 相互邻近云雷达站点的 SG-VMTR 变化趋势和统计特征近似, 在一定程度上可替代使用; 融合后卫星反演云顶高度与云雷达观测云顶高度相关系数为 0.90, 融合后较融合前均方根误差减小了 720 m, 偏差降低至 -17.7 m。本研究为后续开发星地融合面上云顶高度产品提供了参考。

关键词: 云顶高度, FY-4B, 毫米波云雷达, 温度递减率

中图分类号: P413

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.061101

Research on the Method for Inversion Cloud Top Height by Cloud Radar and FY-4B

HU Shuzhen^{1,2,3}, TAO Fa^{1,2,3}, ZHANG Xuefen^{1,2,3}, WANG Chaojie⁴
WANG Zhicheng¹, MAO Jiajia^{1,2,3}

1 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Environment Characteristics and Effects for Near-Space, Beijing 100081

3 CMA Research Centre on Meteorological Observation Engineering Technology, Beijing 100081

4 Henan Meteorological Service Center, Zhengzhou 450003

Abstract: The satellite-ground temperature difference was derived from the cloud top temperature of FY-4B and the air temperature of automatic weather stations. Combined with the cloud top height (CTH) observed by cloud radar, the satellite-ground vertical mean temperature lapse rate (SG-VMTR) was calculated and compared with the vertical temperature lapse rate (γ) fitted from

*国家自然科学基金项目 (U2442214) 和中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J062) 共同资助

2025 年 10 月 13 日收稿; 2026 年 6 月 11 日收修定稿

第一作者: 胡树贞, 主要从事毫米波雷达资料分析及应用研究. E-mail: 052310421hu@163.com

通讯作者: 陶法, 主要从事地基遥感垂直观测技术研究及应用. E-mail: taofa@163.com

the radiosonde temperature profile at the same stations. Meanwhile, the SG-VMTR was applied to other adjacent satellite pixels to achieve the fusion inversion of the satellite CTH in the surrounding area of the cloud radar, and the inversion results were verified and analyzed. The results show that the SG-VMTR and γ values calculated at the same station were closely aligned and exhibited consistent temporal trends. The variation trends and statistical characteristics of the SG-VMTR at adjacent cloud radar stations were similar and can be used as substitutes to a certain extent. The correlation coefficient between the fused satellite-derived CTH and the cloud radar observed CTH was 0.90, while the root mean square error decreased by 720 m and the bias error reduced to -17.7 m compared to pre-fusion results. This study lays a foundation for developing subsequent satellite-ground fusion regional CTH products.

Key words: cloud top height, FY-4B, millimeter-wave cloud radar, temperature lapse rate

引 言

云是大气热力和动力过程的表现形式之一，是地球水汽循环的重要环节，同时也是天气变化的重要征兆，云高、云量和云状可反映大气的不同状态和变化趋势。其中，云顶高度作为云的关键气象参数，在气象学研究和天气预报等领域具有至关重要的研究价值，其可影响大气的辐射收支、云的生命周期和降水形成过程（吕达仁等，2003；Min et al, 2020）。长期的云观测数据有助于了解云在气候变化中的作用机制，从而更好地预测气候变化趋势。在航空飞行领域，飞行员需根据云的高度、厚度、形状及移动速度等信息规避飞行风险，以确保飞行安全。

当前，国内已形成了多维度、多平台的云观测技术体系（张鹏等，2025b），主要分为天基卫星观测与地基雷达观测。天基卫星观测方面，气象卫星从高空提供大范围、连续的对地观测云图数据，广泛应用于天气预报、气候模型和灾害预警中。其中，利用卫星上的红外传感器测量云顶的热辐射，结合普朗克定律将辐射信号转换为温度，从而得到云顶温度分布是一项十分重要的应用。云顶温度是衡量云层垂直发展程度的一个重要指标，且与云顶高度存在明确的物理关联，其可进一步反演云顶高度（Tan et al, 2019；王富和赵宇，2021）。但该反演方法存在显著局限性，大气中存在的水汽、温室气体、气溶胶等成分会吸收或散射红外辐射；另外，云的复杂性，如光学厚度、相态等差异，会影响温度-高度之间的转换精度，制约卫星云顶高度反演结果的可靠性（樊宏杰等，2017；宇路和傅云飞，2017）。地基雷达观测方面，毫米波云雷达可获取云的垂直分布和内部信息，常用于分析云的微物理特征

(刘黎平, 2021; 陈文姝等, 2025), 提升了降水预测精度。特别是工作波长为毫米级的云雷达, 对云粒子具有极高的探测灵敏度, 可有效实现对卷云和层云的探测。另外, 云雷达具有较高的时间和空间分辨率, 且不受气溶胶和云层厚度的影响干扰, 对云顶高度可进行较为精确的测量(李思腾等, 2015; 胡树贞等, 2017; 顾桃峰等, 2023)。但地基云雷达的观测范围有限, 只能获取其安装位置天顶方向的云顶高度信息, 无法提供区域面上的云顶高度分布, 难以满足大范围气象监测需求。综上, 单一使用气象卫星或地基云雷达获取云顶高度信息均存在一定的局限性。因此, 融合气象卫星和地基云雷达观测数据, 进行面上云顶高度的联合反演, 是提升云顶高度测量精度和空间分布的有效途径。

本文基于 FY-4B 卫星与地基云雷达对云顶同步观测的特点(李琦等, 2021), 通过计算卫星反演云顶温度与自动气象站气温之间的温度差, 结合云雷达观测云顶高度, 得到云顶至地表区间的星地垂直温度平均递减率(SG-VMTR); 通过分析邻近云雷达站点间的 SG-VMTR 变化特征, 提出一种星地融合云顶高度反演方法, 并利用实测数据完成反演结果的验证分析, 本研究结果旨在为后续开发星地融合面上云顶高度产品提供参考。

1 资料和数据处理

1.1 观测资料

研究所用地基数据来源于 2024 年 9 月至 2025 年 8 月, 肇州、哈尔滨、海淀、怀柔、临安、衢州、邵武、福州、清远、河源共 10 个同址建设的云雷达、自动气象站, 云雷达主要技术指标列于表 1。所有云雷达均采用全固态、脉冲压缩、多普勒技术体制, 观测模式为垂直对顶(曾正茂等, 2021), 连续探测垂直方向上各类非降水云和弱降水的垂直廓线(郭立平等, 2024; 王卫民等, 2024)。通过对含有云层信息的基数据廓线进行云层识别提取(如上升和下降沿检测, 从低到高无回波转为有回波为云底, 有回波转为无回波为云顶), 并在时间和空间上对多层云进行合理的合并处理, 提取每层云体的上边界作为云顶高度, 云体的下边界作为云底高度, 云体上、下边界差值为云厚度(张婷等, 2024)。郝倚天等(2018)、胡树贞等(2020)以及彭杰等(2023)对该技术体制云雷达的探测性能进行了较为全面的评估与对比分析, 结果表明, 云雷达的云高探测准确性较高。

卫星数据包括同时期 FY-4B 反演云顶温度、云顶高度和云分类产品。其中, 云顶温度用于星地融合云顶高度反演, 云顶高度用于与星地融合云顶高度对比分析, 云分类用于星地匹配样本筛选。FY-4B 利用 CO₂ 吸收通道和红外窗区通道分别对云顶高度、云微物理敏感的特点, 通过最优估计迭代计算, 得到有云像元处的云顶温度, 再利用数值天气预报廓线产

品插值反演对应的云顶高度（段炼和张杨，2022；张淼等，2025）。常规工作模式下，FY-4B 每 15 min 生成一幅 4 km 分辨率的全圆盘云顶温度、云顶高度、云分类产品（张淼等，2024）。

表 1 毫米波云雷达主要技术指标

参数	指标
技术体制	全固态、脉冲压缩、多普勒
工作频率	Ka 波段(34.5 GHz±500 MHz)
天线直径/m	1.8
波束宽度	≤0.5°
观测模式	垂直对顶
时间分辨率/min	1
空间分辨率/m	30
基数据产品	反射率因子、径向速度、速度谱宽
云高产品	云底高度、云顶高度
云高层数	≤5 层

1.2 数据处理

根据星地融合反演算法及验证需求，基于安装位置将 10 个地基云雷达站点分为 5 组，相关云雷达分组及各站基本信息列于表 2。由于云雷达和 FY-4B 的时间和空间分辨率均不同，在数据融合时需对星地观测数据进行时空匹配处理（王瑾等，2022；张鹏等，2025a），具体为：根据云雷达安装点位置，查找与 FY-4B 最为接近的像元点进行空间匹配；基于泰勒冻结假设，以 FY-4B 观测时次为基准，往前 10 min 作为云雷达匹配时间窗，将时间窗内云雷达观测的多个云高数据进行聚合处理。数据处理方法为：（1）分钟降水量≥0.4 mm 时，云雷达信号受雨衰影响显著，该站点该时次不参与星地匹配；（2）为避免非气象回波对云雷达的干扰（陶法等，2020），云雷达观测云层厚度低于 2 km 时，该站点该时次不参与星地匹配；（3）在 10 min 内云雷达连续输出云高，且 FY-4B 输出云顶温度，该站点该时次参与星地匹配；（4）为避免引入异常值，对云雷达多个云高进行聚合处理选用平均方式，计算时去除最大值和最小值。另外，星地匹配需用到与云雷达同址的自动气象站气温。

表 2 毫米波云雷达分组及站点基本信息

Table 2 Millimeter-wave cloud radar grouping and site basic information

分组序号	站点	海拔高度/m	站间距/km
1	肇州	148.7	107
	哈尔滨	115.0	
2	海淀	46.3	50
	怀柔	75.2	
3	临安	138.7	168
	衢州	83.6	
4	邵武	370.8	219
	福州	112.1	
5	清远	80.4	172
	河源	115.1	

2 特征分析和融合方法

2.1 星地匹配数据特征分析

垂直温度递减率 (γ) 是表征对流层中气温随高度增加而降低的速率，定义为单位高度

变化对应的温度变化量，其数值会随地理位置、季节、天气状况和大气层结的不同而变化（谢劲峰等，2023a；2023b），并非恒定常量。较为真实的大气 γ 可通过探空温度廓线拟合得到（卢萍等，2017）。

已知 FY-4B 反演云顶温度、自动气象站气温，二者作差即可得到云顶至地表区间的温度差，云雷达观测云顶高度与 FY-4B 反演云顶温度是同一云项目标对应的两个要素，通过星地两点温度法计算云顶至地表区间的 SG-VMTR，其概念模型如图 1 所示，计算公式为：

$$SG-VMTR = \frac{CTT - T}{H} \quad (1)$$

式中：SG-VMTR 为星地垂直温度平均递减率，单位： $^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ；CTT 为 FY-4B 反演云顶温度，单位： $^{\circ}\text{C}$ ； T 为自动气象站气温，单位： $^{\circ}\text{C}$ ； H 为云雷达观测云顶高度，单位： km 。

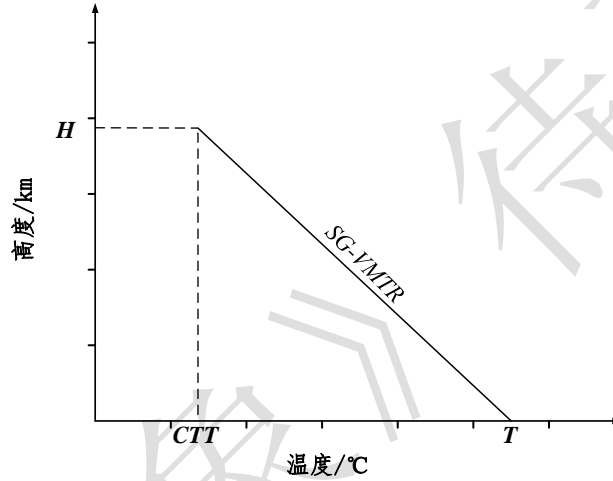


图 1 星地垂直温度平均递减率概念模型

Fig.1 Concept model of satellite-ground vertical average temperature lapse rate

利用式（1）计算 2024 年 9 月至 2025 年 8 月，表 2 所列云雷达站点所有星地匹配样本的 SG-VMTR，共得到 17152 组数据（图 2）。由图 2 可知，SG-VMTR 整体呈正态分布特征，数据集中分布在 $-8 \sim -3^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ，占比为 96.4%。该分布特征表明，绝大多数大气状态下云顶至地表之间的 SG-VMTR 相对稳定，符合对流层平均温度递减规律，但也存在少数极端值，可能与特定天气过程（如逆温、锋面过境等）或反演误差有关。

为验证 SG-VMTR 模型的合理性，选取与云雷达同址的哈尔滨站和衢州站探空数据，对地面至 15 km 高度范围内的探空温度廓线进行线性拟合，得到 γ 。将拟合结果与站点计算的 SG-VMTR 进行时间匹配，两者样本变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知，哈尔滨站 γ 与 SG-VMTR 的均值分别为 $-5.71^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 、 $-5.51^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ，衢州站的对应均值分别为 $-5.5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 、 $-5.4^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ，因此基于探空廓线拟合的 γ 与星地两点温度法计算的 SG-VMTR 的变化趋势和

数值高度一致，验证了 SG-VMTR 模型的有效性，但也存在少量偏差较大的样本，原因可能为云雷达观测云顶高度选取不合理、FY-4B 反演云顶温度在复杂云系中存在不确定性，或大气中存在逆温层等非绝热过程等，后续需进一步深入分析评估。剔除上述不确定因素后，采用星地两点温度法计算的 SG-VMTR 仍能在一定程度上反映本地垂直大气的温度变化特征。

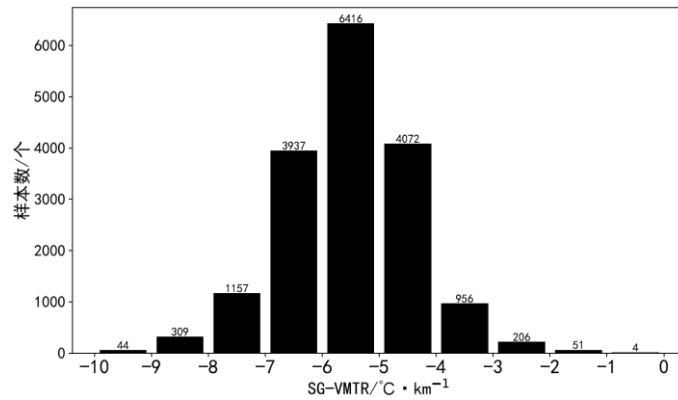


图2 2024年9月至2025年8月10个站点的17152组数据 SG-VMTR 分布
Fig.2 Distribution of SG-VMTR for 17152 data of 10 stations from September 2024 to August 2025

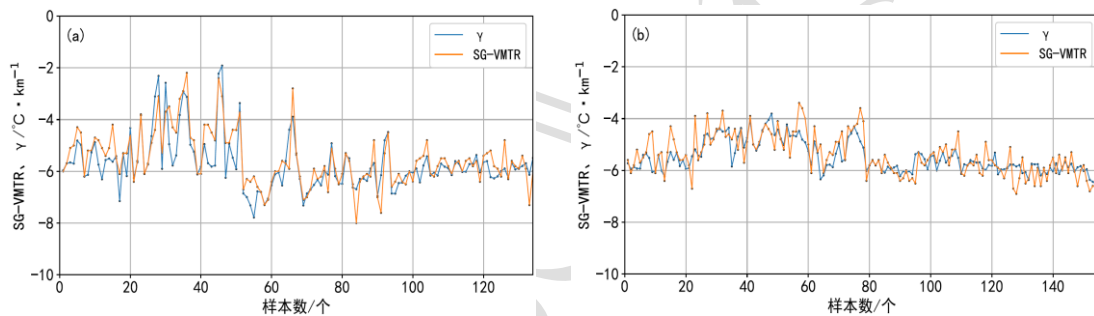
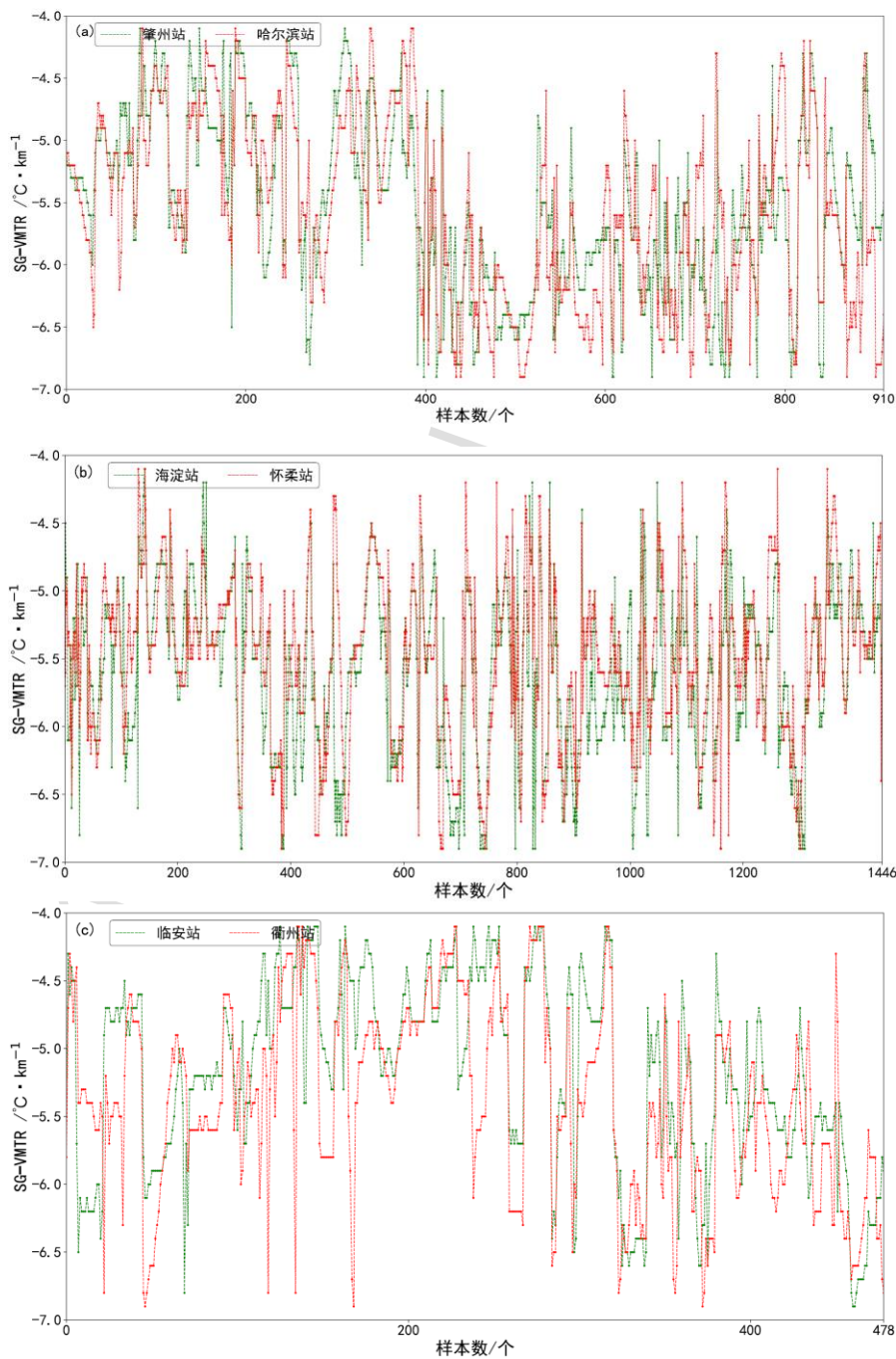


图3 2024年9月至2025年8月 (a) 哈尔滨站和 (b) 衢州站 SG-VMTR 与 γ 样本变化曲线
Fig.3 Variation curves of SG-VMTR and γ samples at (a) Harbin and (b) Quzhou stations from September 2024 to August 2025

为进一步验证算法的可靠性，以下仅统计每个分组中两部云雷达均同时星地匹配成功的时次样本，并引入 FY-4B 云分类产品作为约束条件：即当同一分组两个像元点的云分类一致时，该站点该时次参与星地匹配。同时，为降低极端值干扰，仅对 SG-VMTR 介于 $-7 \sim -4 \text{ } ^\circ\text{C km}^{-1}$ 内的样本进行分析。考虑不同区域在经纬度、地表类型、高程、植被覆盖及云微物理特性等方面的差异，SG-VMTR 可能存在显著的区域性变化。为此，对表 2 所列每个分组计算的 SG-VMTR 进行趋势与统计特征分析，结果如图 4 和表 3 所示。由图 4 可知，5 个分组 SG-VMTR 样本数的曲线变化趋势较为一致，但均存在频繁的短时波动。这种抖动主要源于星地匹配样本在时间分布上的不连续性，同时反映出 SG-VMTR 对云系演变、天气过程等短时大气结构变化的敏感性，也体现了引入 FY-4B 云分类产品作为约束条件的必要性。

由表 3 可知，同一分组相互邻近站点 SG-VMTR 的均值和标准差较为接近，均值分布在 $-5.84 \sim -5.18^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ，最大组内差值为 $0.19^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ，标准差介于 $0.76 \sim 0.93^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ，最大组内差值仅为 $0.12^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 。这表明在一定的空间范围和时间尺度内，SG-VMTR 具有良好的空间一致性与可移植性。此外，代表南方地区的第 3~5 组（临安、衢州、邵武、福州、清远、河源），其 SG-VMTR 的变化幅度普遍大于代表北方地区的第 1~2 组（肇州、哈尔滨、海淀、怀柔）。这一差异可能与南方地区更为频繁的降水和复杂的云系演变过程有关，其导致了大气温度垂直结构的不稳定性。



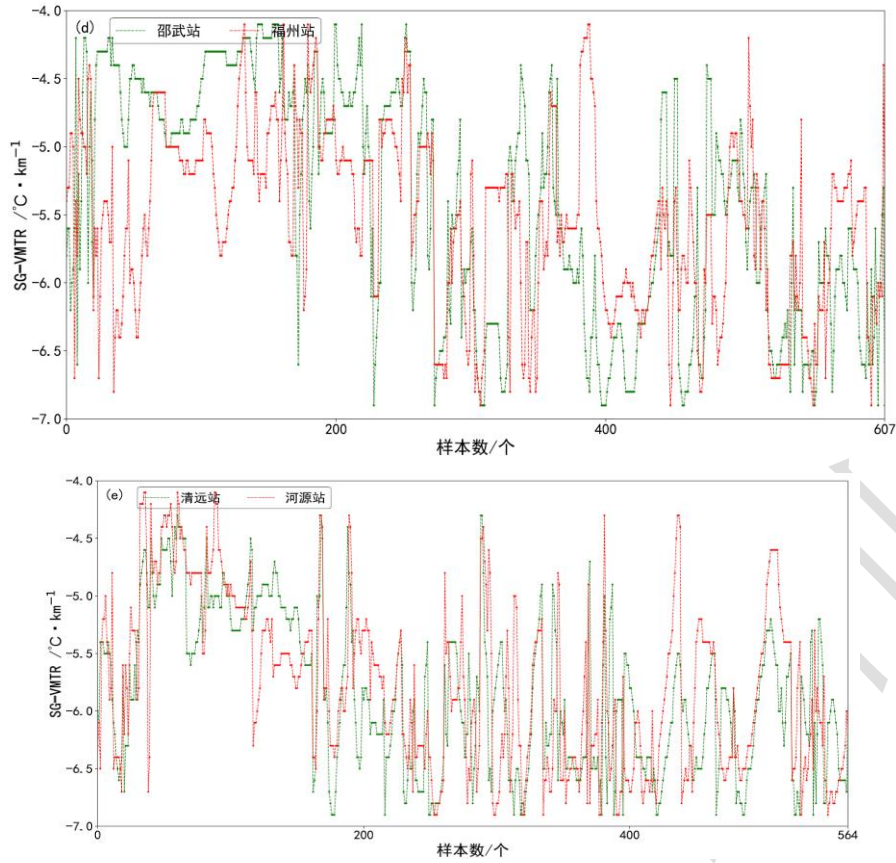


图 4 2024 年 9 月至 2025 年 8 月 5 个分组站点 SG-VMTR 样本数变化曲线

Fig.4 Variation curves of SG-VMTR samples for five groups of site from September 2024 to August 2025

表 3 2024 年 9 月至 2025 年 8 月 5 个分组站点 SG-VMTR 统计特征

Table 3 Statistical characteristics of SG-VMTR for five groups site from September 2024 to August 2025

分组序号	站点	均值/ (°C · km ⁻¹)	标准差/ (°C · km ⁻¹)
1	肇州	-5.54	0.84
	哈尔滨	-5.56	0.85
2	海淀	-5.60	0.76
	怀柔	-5.49	0.76
3	临安	-5.18	0.83
	衢州	-5.37	0.84
4	邵武	-5.42	0.93
	福州	-5.53	0.81
5	清远	-5.84	0.82
	河源	-5.76	0.85

2.2 星地云顶高度融合方法

上述分析表明，在满足一定条件（尤其是覆盖范围较大的同一云系）的前提下，空间上相互邻近站点的 SG-VMTR 具有较好的可替代性与空间一致性。基于这一特征，针对时间跨度较短、空间范围有限的层状云系，可构建由云雷达观测云顶高度、FY-4B 反演云顶温度及自动气象站气温组成的实时星地匹配数据数组。通过计算参考点的 SG-VMTR，并将其应用于该点周边邻近的其他卫星像元，即可实现对其他无云雷达覆盖像元的云顶高度反演，计算公式如下：

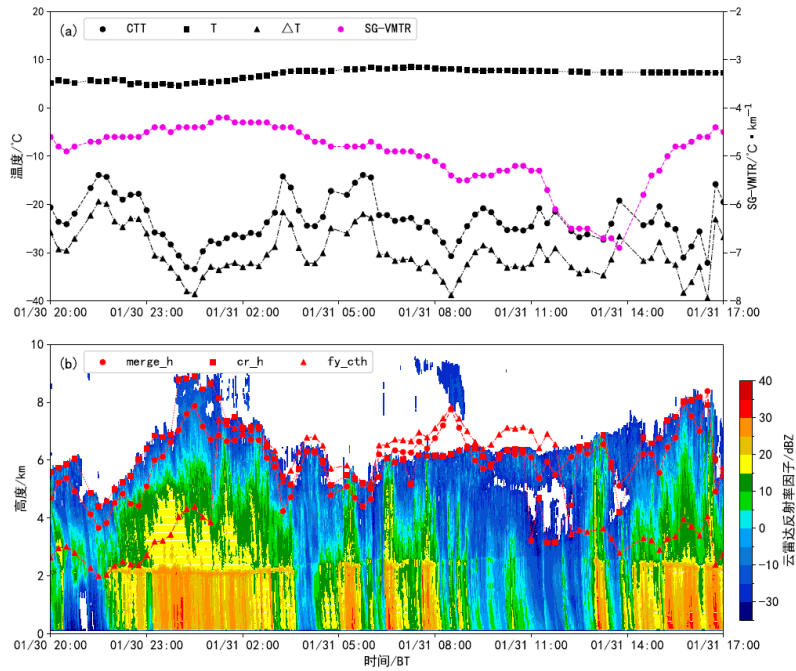
$$H_{ij} = \frac{CTT_{ij} - T_{ij}}{SG-VMTR_{\alpha}} \quad (2)$$

式中： H_{ij} 为FY-4B第*i*行、第*j*列像元位置融合后卫星反演云顶高度，单位：km；SG-VMTR_{ij}为与FY-4B第*i*行、第*j*列像元空间邻近云雷达站点计算的星地垂直温度平均递减率，单位： $^{\circ}\text{C km}^{-1}$ ；CTT_{ij}为FY-4B第*i*行、第*j*列像元位置卫星反演云顶温度，单位： $^{\circ}\text{C}$ ； T_{ij} 为与FY-4B第*i*行、第*j*列像元位置邻近自动气象站气温，单位： $^{\circ}\text{C}$ 。

在实际应用中，SG-VMTR的时空外推使用需遵循一定的约束条件，其适用的空间范围和时间跨度均不宜过大，以避免大气层结非均匀性带来的误差。然而，若目标区域处于同一稳定云系(如层状云系)的控制下，融合后卫星反演云顶高度的准确性较高(邵建等, 2025)。当同一云系覆盖区域存在多部云雷达时，气温用实况分析场中的格点温度替代，分别计算各站点的SG-VMTR，再通过空间插值得到每个卫星像元对应的SG-VMTR，从而实现区域尺度云顶高度的融合反演。

3 算法验证分析

为验证星地融合反演云顶高度方法的可行性与有效性,选取2025年1月30—31日发生在临安站的一次典型层状云降水过程进行个例分析。图5为2025年1月30—31日临安站云雷达反射率因子、自动气象站气温、卫星反演云顶温度、星地温度差、云雷达观测云顶高度以及融合前卫星反演云顶高度、融合后卫星反演云顶高度(利用同分组衢州站SG-VMTR计算得到)等变量的时序变化。由图5a可知,该过程期间自动气象站气温介于 $4.6\sim 8.5^{\circ}\text{C}$,变化范围小且缓慢,反映出地表热力条件相对稳定;而卫星反演云顶温度介于 $-33.4\sim -13.9^{\circ}\text{C}$,波动范围明显高于自动气象站气温,说明云顶高度的起伏变化主要受卫星反演云顶温度的影响。星地温度差的变化范围介于 $-39.8\sim -19.4^{\circ}\text{C}$,并与云雷达观测云顶高度呈负相关,符合大气热力学基本原理。利用各要素计算临安站SG-VMTR的变化范围为 $-6.9\sim -4.2^{\circ}\text{C km}^{-1}$,尽管存在一定波动,但其变化幅度远小于星地温度差,表明SG-VMTR在时间上具有较好的稳定性,适合作为星地融合反演的关键参数。由图5b可知,融合后卫星反演云顶高度与云雷达观测云顶高度在整体变化趋势上最为接近,能够较为精确地反映云顶的起伏变化细节。融合前卫星反演云顶高度仅在降水过程中间时段与云雷达观测云顶高度较为一致,而在降水初期与末期均出现系统性偏低现象。值得注意的是,1月31日08时(北京时,下同)左右,在降水云系的上方存在较薄的弱云回波,融合后与融合前卫星反演云顶高度有明显升高的趋势,说明此段时间卫星反演云顶温度受到降水云系和高层云系的共同影响,反演云顶高度叠加了双层云的贡献(赵渊明等, 2024)。总体而言,融合后卫星反演云顶高度在整个过程中与云雷达观测云顶高度的变化趋势更为吻合,能够更精细地刻画云顶结构的动态演变。

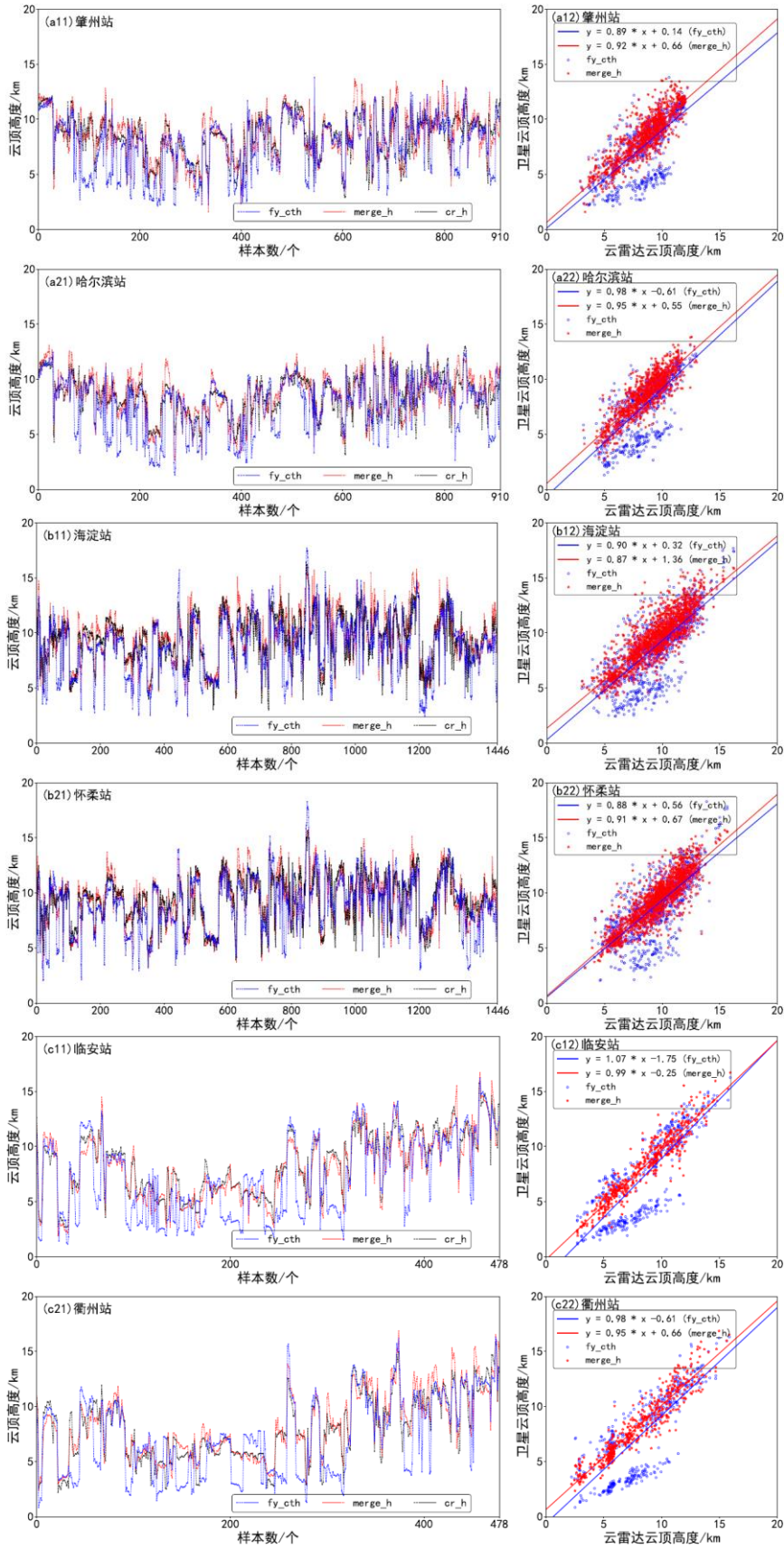


注： T 为自动气象站气温， CTT 为卫星反演云顶温度， ΔT 为星地温度差， cr_h 为云雷达观测云顶高度， fy_cth 为融合前卫星反演云顶高度， $merge_h$ 为融合后卫星反演云顶高度，下同。

图5 2025年1月30—31日临安站云雷达反射率因子（填色）及各要素的时序变化

Fig.5 Time series diagram of cloud radar reflectivity factor (colored) and various parameters at Lin'an Station from 30 to 31 January 2025

为进一步验证融合方法的准确性，将表2所列分组相互使用邻近站点计算SG-VMTR，利用式(2)计算临安站融合后卫星反演云顶高度，并将其与云雷达观测云顶高度及融合前卫星反演云顶高度进行对比分析，结果如图6所示。从图6可知，10个站融合后卫星反演云顶高度与云雷达观测云顶高度变化趋势更为一致，尤其在云顶高度发生显著波动的时段，融合后能够较好地跟踪观测变化。相比之下，融合前卫星反演云顶高度在某些时段存在明显的系统性偏低现象，尤其是代表南方地区的第3~5组表现突出。以云雷达观测云顶高度作为基准，对融合后和融合前卫星反演云顶高度进行相关性分析，除河源站外，其余9个站融合后的相关系数、均方根误差、偏差指标均显著优于融合前产品。在相关系数方面，融合前各站点相关系数介于0.71~0.87，融合后提升至0.86~0.95，融合后全部站点的相关系数得到提升，其中衢州站由融合前的0.80提高至0.94，表明融合后结果在变化趋势上与基准数据更为一致。相比融合前，融合后各站点的均方根误差均显著下降，融合前各站点均方根误差介于1709.2~2408.3 m，融合后下降至989.9~1427.0 m，其中临安站最大降幅超过1400 m，说明融合算法有效抑制了反演结果的离散程度。在偏差方面，融合前卫星反演云顶高度在所有站点表现为系统性负偏差（云顶高度偏低），偏差介于-1162.1~-46.3 m，融合后偏差显著减小，部分站点接近零偏差。



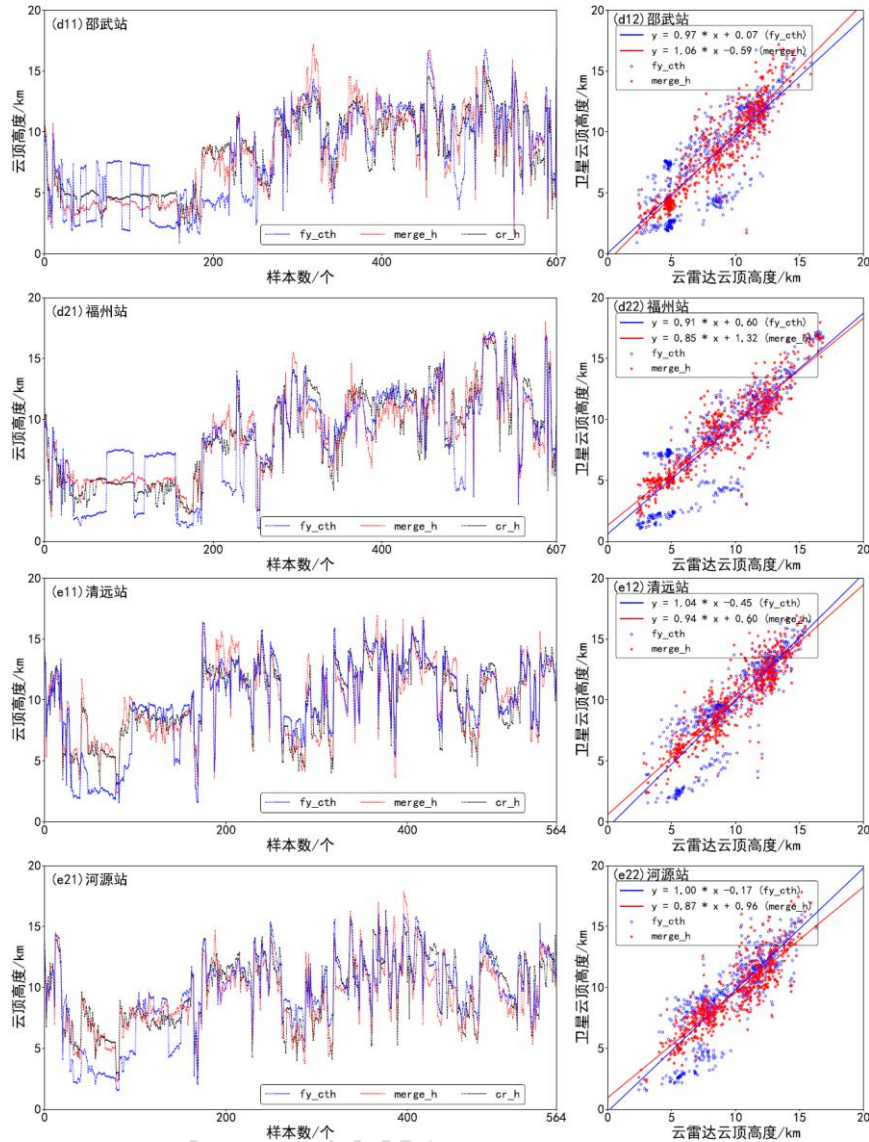


图 6 2024 年 9 月至 2025 年 8 月 5 个分组卫星融合前、后云顶高度与云雷达观测云顶高度样本数变化曲线（左图）及其相关性分析（右图）

Fig.6 Variation curves of the satellite cloud top heights (before and after fusion) and the radar cloud top heights for five groups from September 2024 to August 2025 (left panel), and their correlation analysis (right panel)

为综合检验融合算法的改进效果，将图 6 中 5 个分组全部样本融合前和融合后卫星反演云顶高度与云雷达观测云顶高度进行整体相关性及误差分析（图 7）。从图 7 可知，融合后卫星反演云顶高度与云雷达观测云顶高度之间的相关系数由融合前的 0.81 提升至 0.90，均方根误差在融合前的基础上减小了 720 m，偏差由融合前的-574.4 m 降低至-17.7 m，表明融合后结果在整体趋势上与云雷达实测数据更为一致，有效抑制了反演结果的离散程度，同时大幅纠正了原始卫星产品在云顶高度反演中的系统性低估问题。

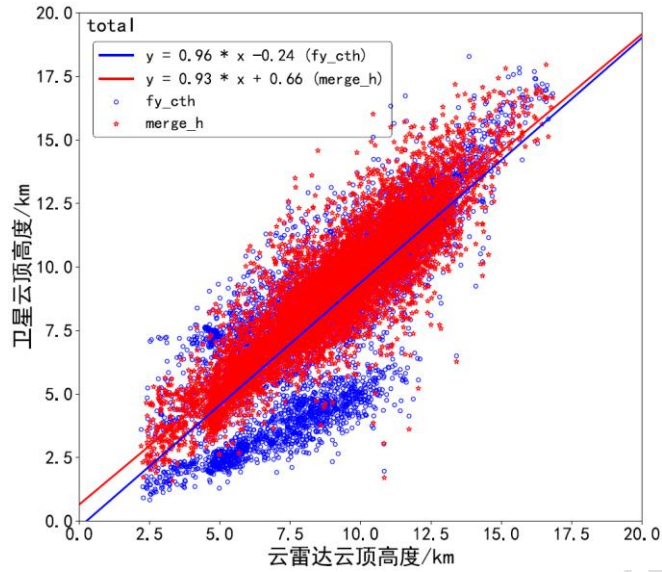


图7 2024年9月至2025年8月5个分组全部样本卫星云顶高度融合前、后与云雷达观测云顶高度相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of satellite cloud top height (before and after fusion) and the radar cloud top heights for all samples across five groups from September 2024 to August 2025

4 结论与讨论

基于地基云雷达和 FY-4B 对云顶同步观测的特点，利用 FY-4B 反演云顶温度和自动气象站气温得到星地温度差，联合云雷达观测云顶高度，提出了基于 SG-VMTR 反演卫星云顶高度的融合方法，实现了云雷达安装点周边区域卫星云顶高度的融合反演，并对反演结果进行了验证分析。得出以下结论：

(1) 利用星地两点温度法计算 SG-VMTR 与通过探空温度廓线拟合得到温度递减率变化趋势一致，能够反映本地垂直大气的温度变化特征。

(2) 在满足一定条件的前提下，空间上相互邻近云雷达站点计算的 SG-VMTR 变化趋势和统计特征较为接近，具有较好的可替代性与空间一致性。

(3) 基于 SG-VMTR 反演卫星云顶高度方法，可实现云雷达安装点周边区域云顶高度的精确反演，改善了 FY-4B 对中低高度云层的反演精度，一定程度上提高了卫星云高产品的数据质量。

星地融合云顶高度反演方法对于性质较为单一且分布区域较大的层状云系准确性较高，随着地基云雷达站网布局密度的提高，本研究为后续开发星地融合面上云顶高度产品提供了较为可行的技术方案。值得注意的是，本方法对于对流云等尺度较小或均匀性较差的云层，融合反演结果的不确定度将增加。

参考文献

- 陈文姝, 黄兴友, 卜令兵, 等, 2025. 南京地区冰云个例微物理参数的地基毫米波云雷达观测反演分析[J]. 气象学报, 83(1): 115-128. Chen W S, Huang X Y, Bu L B, et al, 2025. Retrieval and analysis of ice-cloud microphysical parameters over Nanjing based on ground-based millimeter-wavelength cloud radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 83(1): 115-128 (in Chinese).
- 段炼, 张杨, 2022. 基于卫星红外窗区数据的云顶高度反演方法[J]. 红外, 43(8): 33-43. Duan L, Zhang Y, 2022. Retrieving method of cloud top height based on satellite infrared window data[J]. Infrared, 43(8): 33-43 (in Chinese).
- 樊宏杰, 黄亦鹏, 李万彪, 2017. 基于卫星红外遥感的云顶高度反演算法综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 53(4): 783-792. Fan H J, Huang Y P, Li W B, 2017. Overview of retrieval algorithm of cloud-top height based on satellite infrared remote sensing[J]. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, 53(4): 783-792 (in Chinese).
- 顾桃峰, 岳海燕, 伍光胜, 等, 2023. 毫米波云雷达与激光云高仪气象探测性能对比分析[J]. 环境科学学报, 43(1): 275-283. Gu T F, Yue H Y, Wu G S, et al, 2023. Comparative analysis of meteorological detection performance between millimeter-wave cloud radar and altimeter[J]. Acta Sci Circum, 43(1): 275-283 (in Chinese).
- 郭立平, 刘姝, 李敬海, 等, 2024. 毫米波云雷达在高影响天气中的预警应用[J]. 干旱气象, 42(3): 465-472. Guo L P, Liu S, Li J H, et al, 2024. Early warning application of millimeter wave cloud radar in high impact weather[J]. J Arid Meteor, 42(3): 465-472 (in Chinese).
- 郝倚天, 陈洪滨, 毕永恒, 等, 2018. 8 毫米云雷达与探空观测确定云底和云顶高度的对比分析[J]. 遥感技术与应用, 33(6): 1063-1072. Hao Y T, Chen H B, Bi Y H, et al, 2018. Comparative analysis of cloud boundary observed by millimeter wave cloud radar and radiosonde[J]. Remote Sens Technol Appl, 33(6): 1063-1072 (in Chinese).
- 胡树贞, 曹晓钟, 陶法, 等, 2020. 船载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析[J]. 气象, 46(6): 745-752. Hu S Z, Cao X Z, Tao F, et al, 2020. Comparative analysis of cloud macro characteristics from two shipborne millimeter wave cloud radars in the West Pacific[J]. Meteor Mon, 46(6): 745-752 (in Chinese).
- 胡树贞, 陶法, 马舒庆, 等, 2017. 地基主动式云自动观测设备外场比对试验[J]. 气象科技, 45(6): 988-994. Hu S Z, Tao F, Ma S Q, et al, 2017. Field comparative experiment of active automatic cloud observation equipment[J]. Meteor Sci Technol, 45(6): 988-994 (in Chinese).
- 李琦, 蔡淼, 周毓荃, 等, 2021. 基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征[J]. 大气科学, 45(6): 1161-1172. Li Q, Cai M, Zhou Y Q, et al, 2021. Characteristics of cloud vertical distribution based on cloud identification by radiosonde[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1161-1172 (in Chinese).
- 李思腾, 马舒庆, 高玉春, 等, 2015. 毫米波云雷达与激光云高仪观测数据对比分析[J]. 气象, 41(2): 212-218. Li S T, Ma S Q, Gao Y C, et al, 2015. Comparative analysis of cloud base heights observed by cloud radar and ceilometer[J]. Meteor Mon, 41(2): 212-218 (in Chinese).

- 刘黎平, 2021. 毫米波云雷达观测和反演云降水微物理及动力参数方法研究进展[J]. 暴雨灾害, 40(3): 231-242. Liu L P, 2021. Reviews on retrieval methods for microphysical and dynamic parameters with cloud radar[J]. Torr Rain Dis, 40(3): 231-242 (in Chinese).
- 卢萍, 杨康权, 李英, 2017. 基于加密探空资料对不同海拔高度台站边界层大气的对比分析[J]. 大气科学, 41(6): 1234-1245. Lu P, Yang K Q, Li Y, 2017. A comparative analysis of atmospheric boundary layer based on intensive sounding data at different altitude stations[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1234-1245 (in Chinese).
- 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等, 2003. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾[J]. 大气科学, 27(4): 552-566. Lü D R, Wang P C, Qiu J H, et al, 2003. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China[J]. Chin J Atmos Sci, 27(4): 552-566 (in Chinese).
- 彭杰, 王晓峰, 傅新姝, 等, 2023. 面向业务应用的上海地区毫米波云雷达观测质量评估[J]. 大气科学学报, 46(3): 466-480. Peng J, Wang X F, Fu X S, et al, 2023. Operational usage-oriented evaluation of millimeter radar observations in Shanghai[J]. Trans Atmos Sci, 46(3): 466-480 (in Chinese).
- 邵建, 郑鹏徽, 裴晓蓉, 等, 2025. 宁夏强对流天气 FY-4A 卫星云物理参数特征[J]. 气象, 51(3): 337-348. Shao J, Zheng P H, Pei X R, et al, 2025. Characteristics of FY-4A satellite cloud physical parameters in severe convective weather in Ningxia[J]. Meteor Mon, 51(3): 337-348 (in Chinese).
- 陶法, 官莉, 张雪芬, 等, 2020. Ka 波段云雷达晴空回波垂直结构及变化特征[J]. 应用气象学报, 31(6): 719-728. Tao F, Guan L, Zhang X F, et al, 2020. Variation and vertical structure of clear-air echo by Ka-band cloud radar[J]. J Appl Meteor Sci, 31(6): 719-728 (in Chinese).
- 王富, 赵宇, 2021. 风云四号静止气象卫星的云顶高度反演算法[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 44(3): 412-418. Wang F, Zhao Y, 2021. An algorithm for retrieving cloud top height based on geostationary satellite data of Fengyun-4[J]. J Sichuan Norm Univ (Nat Sci), 44(3): 412-418 (in Chinese).
- 王瑾, 张镭, 杜韬, 等, 2022. 探空和毫米波云雷达探测云高一一致性的时空匹配原则研究[J]. 高原气象, 41(5): 1348-1366. Wang J, Zhang L, Du T, et al, 2022. A study on the principle of space-time matching for the detection of cloud height consistency by radiosonde and millimeter-wave cloud radar[J]. Plateau Meteor, 41(5): 1348-1366 (in Chinese).
- 王卫民, 徐八林, 雷勇, 等, 2024. Ka 波段毫米波云雷达对青藏高原东南缘降水回波的分析[J]. 气象, 50(3): 291-302. Wang W M, Xu B L, Lei Y, et al, 2024. Analysis of precipitation echoes from Ka-band millimeter wave cloud radar on the Southeast margin of the Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 50(3): 291-302 (in Chinese).
- 谢劲峰, 王义杰, 黄良珂, 等, 2023a. 中国区域大气加权平均温度垂直递减率格网模型[J]. 测绘学报, 52(2): 206-217. Xie S F, Wang Y J, Huang L K, et al, 2023a. A grid model for the lapse rate of atmospheric weighted mean temperature over China[J]. Acta Geod Cartogr Sin, 52(2): 206-217 (in Chinese).
- 谢劲峰, 张继洪, 王义杰, 等, 2023b. 大气加权平均温度垂直递减率时空特性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 43(6): 593-599.

Xie S F, Zhang J H, Wang Y J, et al, 2023b. Temporal-spatial characteristics analysis of the lapse rate for atmospheric weighted mean temperature[J]. *J Geod Geodyn*, 43(6): 593-599 (in Chinese).

宇路, 傅云飞, 2017. 基于星载微波雷达和激光雷达探测的夏季云顶高度及云量差异分析[J]. *气象学报*, 75(6): 955-965. Yu L, Fu Y F, 2017. Analysis of cloud-top height and cloud amount difference between spaceborne microwave radar and laser radar detection in boreal summer[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(6): 955-965 (in Chinese).

曾正茂, 郑佳锋, 杨晖, 等, 2021. Ka 波段云雷达非云回波质量控制及效果评估[J]. *应用气象学报*, 32(3): 347-357. Zeng Z M, Zheng J F, Yang H, et al, 2021. Quality control and evaluation on non-cloud echo of Ka-band cloud radar[J]. *J Appl Meteor Sci*, 32(3): 347-357 (in Chinese).

张淼, 李博, 徐娜, 等, 2025. 风云四号 B 星云顶性质产品反演影响因素研究[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 48(3): 398-405. Zhang M, Li B, Xu N, et al, 2025. Research on the factors influencing the inversion of cloud top properties of Fengyun 4B[J]. *J Sichuan Norm Univ (Nat Scie)*, 48(3): 398-405 (in Chinese).

张淼, 徐娜, 陈林, 等, 2024. FY-4B 与 FY-4A 云顶性质产品精度的一致性评估[J]. *热带气象学报*, 40(3): 389-396. Zhang M, Xu N, Chen L, et al, 2024. Consistency of the accuracy of FY-4B and FY-4A cloud top products[J]. *J Trop Meteor*, 40(3): 389-396 (in Chinese).

张鹏, 陈玉宝, 商建, 等, 2025a. 我国天气雷达网和风云三号降水卫星的发展与数据融合应用初探[J]. *气象*, 51(11): 1367-1382. Zhang P, Chen Y B, Shang J, et al, 2025a. Preliminary study on the development and data fusion application of China's weather radar network and FY-3G precipitation satellite[J]. *Meteor Mon*, 51(11): 1367-1382 (in Chinese).

张鹏, 李锐, 赵坤, 等, 2025b. 中国综合气象观测系统的业务发展[J]. *气象学报*, 83(3): 729-760. Zhang P, Li R, Zhao K, et al, 2025b. Development of an integrated meteorological observation system in China[J]. *Acta Meteor Sin*, 83(3): 729-760 (in Chinese).

张婷, 胡树贞, 陶法, 等, 2024. 地基云雷达与 FY-4A 卫星云顶高度联合反演方法[J]. *气象*, 50(7): 859-867. Zhang T, Hu S Z, Tao F, et al, 2024. Joint inversion of cloud top height based on ground-based millimeter-wave cloud radar and FY-4A satellite[J]. *Meteor Mon*, 50(7): 859-867 (in Chinese).

赵渊明, 孙静, 漆梁波, 等, 2024. 基于 L 波段探空观测的 FY-4A 云顶温度产品评估及其在冬季降水相态判识中的应用[J]. *气象*, 50(1): 59-70. Zhao Y M, Sun J, Qi L B, et al, 2024. Evaluation of FY-4A cloud top temperature product based on L-band radiosonde data and its application in winter precipitation type identification[J]. *Meteor Mon*, 50(1): 59-70 (in Chinese).

Min M, Li J, Wang F, et al, 2020. Retrieval of cloud top properties from advanced geostationary satellite imager measurements based on machine learning algorithms[J]. *Remote Sens Environ*, 239: 111616.

Tan Z H, Ma S, Zhao X B, et al, 2019. Evaluation of cloud top height retrievals from China's next-generation geostationary meteorological satellite FY-4A[J]. *J Meteor Res*, 33(3): 553-562.