

# 基于静止轨道微波探测卫星——风云四号微波星垂直探测仪 (Fengyun-4 Geostationary Microwave Sounder, GeoMWS) 仿真资料的海洋云检测方法

陶辉敏<sup>1</sup>, 秦正坤<sup>1</sup>, 韩阳<sup>2,3</sup>, 胡菊旻<sup>4</sup>, 毕研盟<sup>4</sup>

1. 南京信息工程大学 大气科学学院, 南京 210044;
2. 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081;
3. 灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081;
4. 国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要:** 中国正在研发的静止轨道微波探测卫星——风云四号微波星垂直探测仪 (Fengyun-4 Geostationary Microwave Sounder, GeoMWS), 可以提供高时间分辨率的微波观测资料, 对天气系统的监测和数值天气预报具有重要作用。云检测是数值预报系统卫星资料同化中的关键前处理环节, 但是已有的微波探测仪云检测方法是基于极轨微波探测仪器特征设计, 因此开发适用于静止微波探测仪的云检测方法是该卫星资料同化应用的前提条件。本研究基于 GeoMWS 仪器的仿真资料, 在分析了各通道的云敏感性差异的基础上, 提出了一种适用于 GeoMWS 的快速云检测方法。评估结果表明, 该方法在不同时间段内均表现出较高的检测性能: 云检测率 (POD<sub>old</sub>) 和命中率 (HR) 均超过 75%, 虚警率 (FAR<sub>old</sub>) 控制在 20% 以下。对比前人方法的检出率仅能维持在 60% 附近, 该研究为 GeoMWS 在台风监测及资料同化中的应用提供了可靠的理论与方法支持。

**关键词:** 静止卫星, 微波探测, 静止轨道微波探测, 洋面云检测, 仿真资料

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 陶辉敏, 秦正坤, 韩阳, 胡菊旻, 毕研盟. XXXX. 基于静止轨道微波探测卫星——风云四号微波星垂直探测仪 (Fengyun-4 Geostationary Microwave Sounder, GeoMWS) 仿真资料的海洋云检测方法. 遥感学报, XX (XX): 1-19

TAO Huimin, QIN Zhengkun, HAN Yang, HU Juyang, BI Yanmeng. XXXX. Cloud Detection of Simulated Geostationary Microwave Sounding Satellite (FengYun-4/GeoMWS) over Oceans. National Remote Sensing Bulletin, DOI:10.11834/jrs.20265518]

## 1 引言

微波探测仪可以几乎全天候进行探测, 提供覆盖全球的大气温湿度廓线, 对数值预报、资料同化和天气与气候检测都有重要作用 (Guerbette 等, 2016)。目前的星载微波辐射计都是搭载在太阳同步轨道的极轨卫星上, 搭载在 NOAA 序列卫星上的先进微波探测单元-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A, AMSU-A)、微波湿度探测仪 (Microwave Humidity Sounder, MHS) 和先进技术微波探测仪 (Advanced Technology Microwave

Sounder, ATMS), METOP 系列卫星上的 AMSU-A 和 MHS, 风云极轨系列卫星上的微波温度计 (MicroWave Temperature Sounder, MWTS) (卢乃锰和谷松岩, 2016; Chen 和 Cao, 2024)。由于极轨卫星的轨道限制, 单颗卫星每日仅能观测同一地区两次, 无法满足快速变化的天气系统的时间分辨率需求 (潘宁等, 2003), 导致搭载于极轨卫星的微波探测仪难以反映天气系统的精细变化特征 (如热带气旋的快速加强等)。相比之下, 静止轨道卫星可以对同一区域进行连续观测 (崔梦圆

收稿日期: 2025-12-30; 预印本: XXXX-XX-XX

基金项目: 自然科学基金 (编号: U2442218 和 42375004) 和海南黎安教育科技创新联合项目 (编号: ZDYF2025(LALH)005)

第一作者简介: 陶辉敏, 研究方向为卫星资料同化。E-mail: 202312010103@nuist.edu.cn

通信作者简介: 韩阳, 研究方向为卫星定标、校准和反演。E-mail: hanyang@cma.gov.cn

等, 2024), 有效弥补极轨气象卫星重访周期长、对短生命周期灾害性天气监测时效性不足的缺陷。目前静止轨道上搭载的都是可见光波段和红外波段的探测仪器, 如风云静止系列卫星上的先进的静止轨道辐射成像仪 (Advanced Geostationary Radiation Imager, AGRI), 日本葵花系列卫星上的先进葵花成像仪 (Advanced Himawari Imager, AHI) 等, 这些仪器在对天气系统的具有一定的成像能力, 但是穿云透雨方面的能力有限。因此, 为提升对天气系统的时空监测能力, 科学界提出在静止卫星上搭载微波探测仪的设想。美国早在 20 世纪 70 年代就提出了地球静止微波探测仪的设计概念 (Gasiewski 等, 1990), 并建立了原理样机 (Lambrihtsen 等, 2004; Christensen 等, 2007)。目前, 中国提出的首个静止轨道微波探测卫星——风云四号微波星垂直探测仪 (Fengyun-4 Geostationary Microwave Sounder, GeoMWS) 已转入初样研制阶段, 并已完成了采用大型真实孔径天线方案的原型的开发 (吴季等, 2018; 谢振超等, 2018; 王彦, 2016)。中国计划在 2026 年底前发射搭载高光谱微波探测仪的地球静止气象卫星, 其主要载荷为实孔径毫米波与亚毫米波探测仪。一方面, 其观测通道继承了 FY-3 卫星搭载的微波温度计 (Microwave Temperature Sounder, MWTS) 和微波湿度探测仪 (MicroWave Humidity Sounder, MWHS) 的全部频段; 另一方面, 又新增了 229 GHz、380 GHz 和 425 GHz 等太赫兹频段, 从而显著提升了对大气水凝物 (尤其是冰态水凝物) 以及中高层大气状态的探测能力 (王振占等, 2023; Bi 等, 2024; 刘磊等, 2020)。

卫星升空前, 基于仿真资料进行同化关键技术预研究, 对于实际升空卫星后卫星资料的快速同化具有重要作用 (Chen 等, 2024)。GeoMWS 的发展也对资料同化技术提出了更高的要求。数据同化涉及综合观测信息和背景信息, 考虑到观测误差和背景场误差的特征, 最终得到最接近真实值的分析场。尽管微波辐射对某些非降水云具有一定的穿透能力, 但云水凝物对微波辐射的吸收、发射和散射效应不容忽视 (McNally, 2009)。无论是在晴空同化还是全天空同化, 准确识别晴空和有云区观测资料, 并给予适当的观测误差, 是有效的同化各类观测资料的前提条件。因此, 建立合理、准确的云检测方案对 GeoMWS 资料的同化

应用至关重要。

针对微波资料的云检测研究也得到了很多气象学家的重视。利用微波仪器窗区通道对云的敏感性差异, 很多科学家开发了基于微波资料的云水和云冰反演方法。Weng 和 Grody (1994) 利用美国国防部气象卫星 (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) F10 和 F11 上的 SSM/I 数据, 组合了三组不同微波通道的云液态水路径 (Cloud Liquid Water Path, CLWP) 反演算法。Zhao 等 (2002) 和 Grody 等 (2001) 则分别利用 AMSU 在 23.8 GHz 和 31.4 GHz 波段数据反演洋面 CLWP 的算法; Weng 等 (2003) 进一步校正了 AMSU 亮度温度沿扫描方向的不对称现象, 给出了校正后的 CLWP 算法, 并指出与厚云、冰云相关的冰水路径可以用 89 GHz 和 150 GHz 通道来反演; Tang 等 (2017) 基于组合该反演方法, 加入了低频通道 (10.65 GHz), 利用 MWRI 亮温观测数据反演出海洋上空的 CLWP, 拓展了 CLWP 反演数值的动态范围。

但是不同于反演研究, 卫星资料同化应用中的云检测方法主要目的是分离云区和晴空区观测资料。所以资料同化中最直接的云检测方法是剔除观测与模拟亮温差值绝对值大于给定阈值的视场, 以此在一定程度上减轻云和降水对同化效果的影响 (Geer 等, 2012; Li 等, 2022)。English 等 (1997) 依赖于两个通道存在亮温差做线性回归, 提出了经验性的散射指数来进行陆地云检测。Bennartz 等 (2002) 用 AMSU 资料的 89 GHz 和 150 GHz 通道构造了散射指数来识别不同强度的降水, 朱利剑等 (2018) 根据 MWHS-II 通道间亮温变率随云高以及云水含量增大而减小的特点, 构建了一个基于通道间亮温变率的云检测指数, 该方法仅利用单视场的观测亮温进行云检测, 从而有效减轻了陆地地表发射率和地表温度对云检测效果影响, 实现了更准确的微波湿度计陆地有云资料的识别。具有非线性关系学习能力的深度学习方法也在卫星资料的云检测中得到了应用。Liu 等 (2020) 提出了一种适用于 MWHS-II 的陆地独立云检测算法。该算法基于梯度提升决策树方法, 以气象雷达提供的云信息为参考, 以纬度、天顶角、方位角和各通道亮温为训练要素进行训练, 再对每个像素是否受到云影响做出预测。在美国业务资料同化系统, GSI 系统中, 云检测方法也是基于

AMSU-A通道的观测和模拟亮温之间的偏差,分析云区资料的统计规律,来剔除受云和降水污染的视场。

但是由于传统资料同化习惯的影响,资料同化对不同卫星仪器资料的预处理往往是独立进行,这也导致了资料同化中云检测研究往往局限于单个仪器的观测资料。由于频率差异,微波湿度计资料和微波温度计对不同云类的反应有显著差异,相比而言,微波温度计对粒子较大的水云反应更为敏感,而微波湿度计则是能够反映出小粒子的冰云的影响,为了综合利用这两种仪器对云类的敏感程度的互补性,一些研究提出综合微波温度计和湿度计的云检测方法。Wu等(2021)进一步提出在匹配温度计和湿度计的基础上,利用微波湿度计云指数改进陆地微波温度计资料的云检测,并获得了很好的检测效果。Lorasa等(2023)基于神经网络,利用AMSU-A和MHS微波探测仪的资料建立了云检测算法。Zou等(2017)通过将AMSU-A和MHS的辐射资料合并到一个数据流中进行同化,开发了一种并流云检测方法,从而改进了MHS洋面资料的同化效果。Qin等(2020)检验了融合AMSU-A和MHS微波探测资料的云检测方法对GRAPES业务系统洋面地区微波温度计资料同化的改进效果,Zhou等(2025)则是验证了并流云检测方法对陆地地区微波温度计的同化改进能力。静止微波星微波星垂直探测仪的高光谱特征也为融合不同波段微波探测资料进行云区资料识别,提供了有利的条件。

相比其他遥感仪器,GeoMWS在大气观测中展现出显著优势:一方面在微波频段,只有水汽、氧分子和臭氧分子表现出明显的吸收线,且大气中小的水滴与冰晶对微波散射的影响通常都很小(Liou, 2014)。与红外波段相比,微波频率的辐射受到云的影响较小,对非降水云具有很好的穿透性,因而可利用的微波辐射资料量远高于红外探测仪器。且微波探测是仅有的能够直接反映降水和云中液态水含量特征的被动遥感观测,这一特性可以为天气系统的发生发展提供更多的有用信息(董佩明等, 2014; Eyre等, 2020)。另一方面,与极轨卫星相比,静止微波星垂直探测仪可以对特定区域进行高频次的观测,其观测频次甚至可达到逐小时的时间分辨率,显著提升了数据的时效性。GeoMWS将静止轨道的高时间分辨率优

势与微波探测的穿透能力相结合,可实现对云雨系统及其内部结构的全天候、全天时、高频次三维观测。因此如何同时利用静止微波星垂直探测仪中不同波段通道亮温,建议快速高效的云检测方法,对静止微波探测仪资料的实际应用具有重要价值。

面向数值天气预报业务中卫星资料同化研究,卫星资料同化流程中对云检测方案的运行效率要求很高,因此计算量较复杂的云检测方法对于业务应用存在效率问题。在卫星资料同化中更倾向于仅基于卫星亮温观测资料,尽可能不依赖背景场或者外部资料,实现快速准确的有云资料识别。虽然前人已经开发了适用于极轨卫星微波探测资料的洋面云检测方法,但是极轨卫星与静止卫星的观测方式有显著差异,基于极轨卫星资料开发的云检测方法能否适用于静止卫星资料,还需要进一步研究。本研究基于GeoMWS的仿真数据,分析了各通道亮温随云深厚程度的变化特征,并在此基础上提出了一种适用于GeoMWS的快速云检测方法,并利用长时间的仿真资料进行了定量评估,可以为未来的GeoMWS资料同化应用提供解决方案。

本文的具体结构如下:第2节介绍FY-4M静止轨道微波探测仪及其仿真资料;第3节分析GeoMWS亮温特性和前人的海洋下垫面的云检测方法的适用性;第4节通过对GeoMWS与CLWP真值的对比,提出适用于GeoMWS的云检测方法;第5节评估新云检测方法的有效性;第6节给出全文总结。

## 2 静止轨道微波探测仪及其仿真资料

表1列出了GeoMWS仪器的主要特征参数,包括通道中心频率、3 dB带宽、极化方式等。GeoMWS共配置109个温度探测通道和26个湿度探测通道。仪器前26个通道继承了FY-3F卫星搭载的MWTS的前17个通道,前三个中心频率分别为23.8 GHz、31.4 GHz和50.3 GHz,GeoMWS同时配置了垂直和水平极化通道,用于探测水汽总量和地表发射率等信息;继承了MWS的118 GHz温度探测通道和183 GHz水汽探测通道。在50-60GHz频段,GeoMWS新增了89个高光谱微波温度探测通道,来提高对大气温度廓线的垂直探测

分辨率能力。在此基础上, GeoMWS还新增了太赫兹通道(380 GHz和424 GHz), 其中380GHz是水

汽探测通道, 用于探测大气中冰云分布特征, 424GHz通道用于探测大气温度。

表1 GeoMWS的各通道参数特征

Table 1 Spectral Channel Parameters of the GeoMWS Instrument

序号	中心频率(GHz)	带宽(MHz)	极化	序号	中心频率(GHz)	带宽(MHz)	极化
1	23.8	270	V	112	118.75±0.2	2*100	H
2	23.8	270	H	113	118.75±0.3	2*165	H
3	31.4	180	V	114	118.75±0.8	2*200	H
4	31.4	180	H	115	118.75±1.1	2*200	H
5	50.300	180	V	116	118.75±2.5	2*200	H
6	50.300	180	H	117	118.75±3.0	2*1000	H
7	51.760	400	H	118	118.75±5.0	2*2000	H
8	52.800	400	H	119	165.5	3000	V
9	53.246±0.080	2*140	H	120	183.31±11	2*2000	H
10	53.596±0.115	2*170	H	121	183.31±7.0	2*2000	H
11	53.948±0.081	2*142	H	122	183.31±4.5	2*2000	H
12	54.400	400	H	123	183.31±3.0	2*1000	H
13	54.940	400	H	124	183.31±1.8	2*1000	H
14	55.500	330	H	125	183.31±1.0	2*500	H
15	57.290±0.441	330	H	126	229	2000	V
16	$f_0 \pm 0.217$	2*78	H	127	380.197±18.0	2*2000	H
17	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.048$	4*36	H	128	380.197±9.0	2*2000	H
18	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.022$	4*16	H	129	380.197±1.5	2*500	H
19	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.010$	4*8	H	130	380.197±0.4	2*200	H
20	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.0045$	4*3	H	131	424.763±4.0	2*1000	H
21-67	52.6-55	200	V	132	424.763±1.5	2*600	H
68-109	55-57.3	30*	V	133	424.763±1.0	2*400	H
110	89.000	3000	V	134	424.763±0.6	2*200	H
111	118.75±0.08	2*20	H	135	424.763±0.3	2*100	H

为适应天气监测、数值预报与应急观测等业务需求, 风云四号微波星垂直探测仪设有常规观测和应急观测两种观测模式。由于微波星垂直探测仪天线口径太大无法运动, 因此静止微波卫星采用了卫星平台默认从北向南、从西向东运动方式, 叠加探测仪后端扫描镜360°圆周运动的方式对地扫描。当没有灾害性天气所需要的高频次观测时, 卫星将以此种常规观测模式为主, 整个区域覆盖一次约需60~80分钟, 可以观测中国区域3000 km×3000 km的区域大小(毕研盟等, 2025)。图1展示了未来该探测仪常规观测模式的设计覆盖范围。由于探测仪天线物理尺寸较大, 目前难以配置机械扫描机构, 因此风云四号微波星垂直探测仪在当前方案中尚未规划全圆盘扫描观测模式。

台风周边地区丰沛的水汽可以更好的展示云检测效果, 因此研究选取了2021年西北太平洋台风“烟花”(In-Fa)影响时间段进行研究。台风“烟花”于2021年7月18日在西北太平洋上生成, 其路径持续向西北方向移动, 强度逐渐增强, 最终在7月25日前后于中国浙江省沿海登陆。登陆时, 其中心附近最大风力达13级(风速约38米/秒)。该台风在卫星遥感图像上呈现出清晰的轴对称眼墙结构和组织化的螺旋云带, 是研究台风热力结构及强度演变的典型个例。为此, 本研究模拟了2021年7月16日0000 UTC至7月25日0000 UTC期间GeoMWS逐小时的亮温数据。

观测仿真数据是基于GeoMWS通道特征和扫描几何信息, 在全天候条件下利用欧洲中期天气

预报中心 ERA-5 再分析资料 (Hersbach 等, 2020), 采用了快速辐射传输模式 (Advanced Radiative Transfer Modeling System, ARMS) (Weng 等, 2020) 模拟生成。卫星定轨位置与未来发射时的设计位置一致, 卫星位于赤道上空的 123.5° E。观测几何模拟是利用理想条件下微波辐射计常规扫描模式的地球静止轨道卫星轨道地理信息, 计算每个视场的观测角度, 如太阳天顶角、太阳方位角、卫星天顶角、卫星方位角等。将每个视场的地理定位信息与 ERA-5 资料中的大气廓线 (气压、气温、湿度、云水廓线) 和地表参数 (海陆掩码、地表温度、10 m 风速等) 进行时空匹配, 匹配标准是时间差小于 30 分钟和空间距离小于 10 公里。在 ARMS 云区模拟时需使用 ERA-5 提供的云冰、云水、雪和雨的质量混合比廓线, 水凝物粒子有效半径的计算分别采用 McFarquhar 等 (2003)、Martin 等 (1994) 和 Lin 等 (1983) 的方案。

### 3 GeoMWS 通道亮温随云变化特征

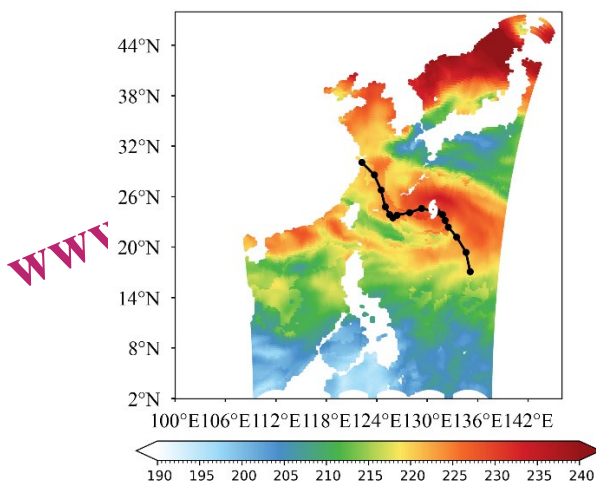
虽然微波频段辐射能够穿透大部分非降水云系, 但是并不意味着微波辐射完全不受到云的影响, 而且对于深厚云, 微波辐射依然不能完全穿透, 因此无法提供深厚云中的大气信息。

为了明确对 GeoMWS 亮温对云的敏感性, 这里给出了部分通道的亮温空间分布图 (图 1)。从图 1 可以看到通道 1 (23.8 GHz, V) 与通道 3 (31.4 GHz, V) 的亮温空间分布特征较为相似:

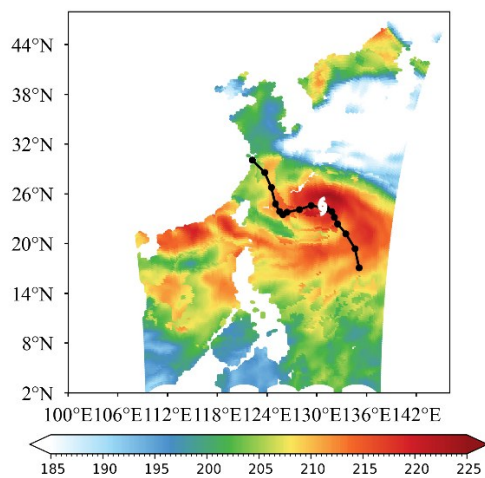
均在日本海区域出现大片的亮温高值区, 超过 220 K; 在台风中心和我国沿海地区 (广东、福建) 亦存在明显的高值区。而两者在 12° N 以南的低纬度海域表现出大片的低温特征, 均小于 200 K。但通道 1 的亮温显著高于通道 3, 通道 1 的亮温范围约为 190 - 250 K, 而通道 3 约为 160 - 220 K; 且通道 1 表现出更显著的亮温变化。

极化方式相同的通道 2 (23.8 GHz, H) 和通道 4 (31.4 GHz, H) 的亮温空间分布特征也较为相似。与通道 1 和通道 3 一样, 两者在台风中心附近分别呈现大于 215 K 和 175 K 的高温分布。但与通道 1 和通道 3 不同的是, 通道 2 和通道 4 不仅在我国沿海地区 (广东、福建) 表现出明显的高值区, 在菲律宾西部和东部海域也有小面积的高温区。而在日本附近, 通道 2 和通道 4 亮温表现出大面积的极小值特征, 分别小于 185 K 和 145 K。这种差异可能与两者所采用的微波频段不同有关。

此外, 为进一步探讨高频通道的空间特性, 本文还分析了通道 8 (52.8 GHz, H) 和通道 11 (53.948±0.081 GHz, H) 的亮温分布。结果显示, 两通道在整个模拟区域的亮温变化幅度较小。通道 8 仅在 44° N 以北区域出现极小值分布, 而其他地区亮温稳定在 263 - 268 K 之间; 通道 11 在中低纬地区 (约 32° N 以南) 表现出大尺度高亮温区, 亮温均高于 252 K, 且区域内变化幅度不超过 5 K。在 32° N 以北地区, 通道 11 的亮温介于 240 - 249 K 之间, 呈现出纬向递减的分布特征。



(a) 通道 1 亮温  
(a) Brightness temperature of Channel 1



(b) 通道 2 亮温  
(b) Brightness temperature of Channel 2

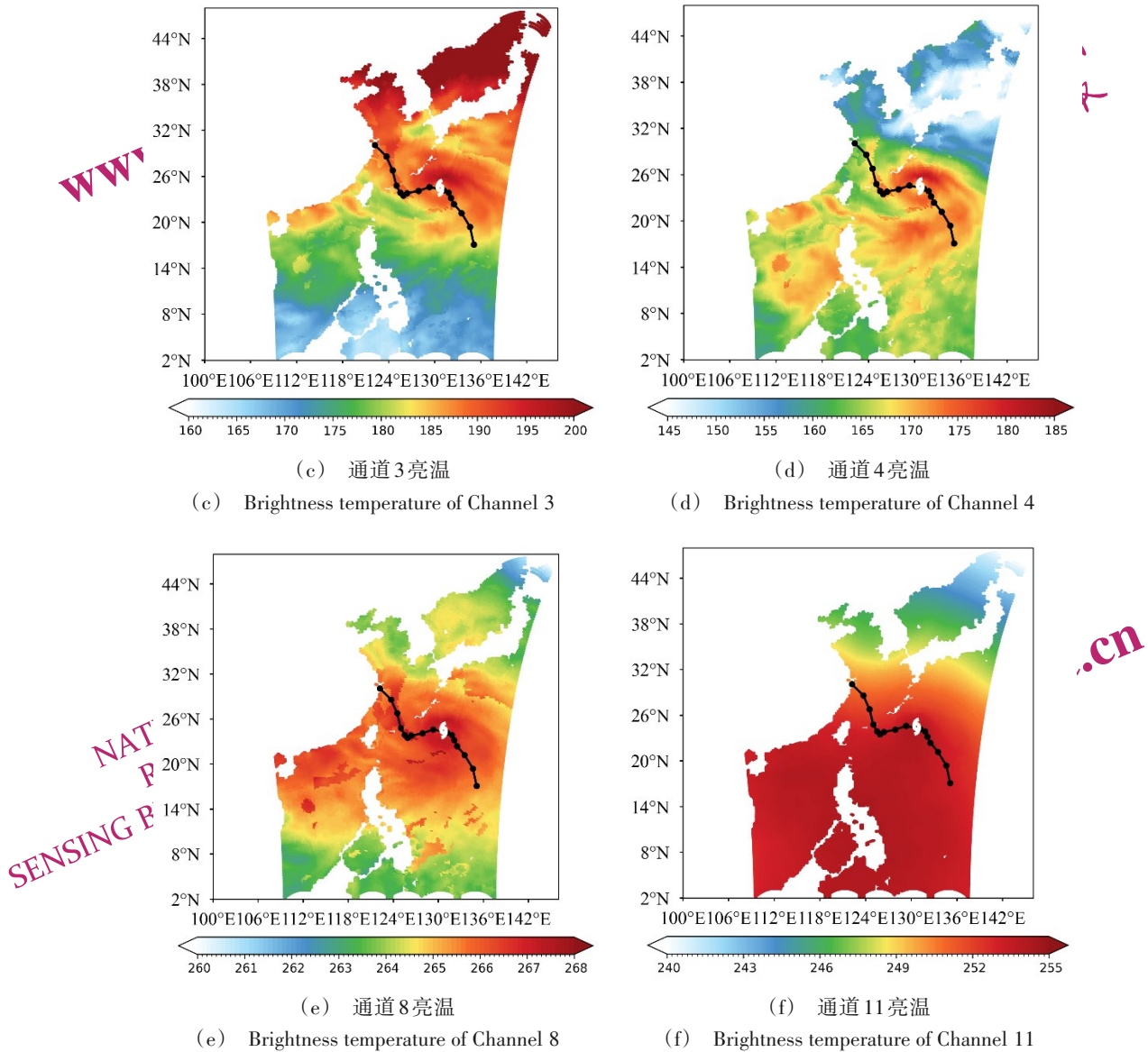
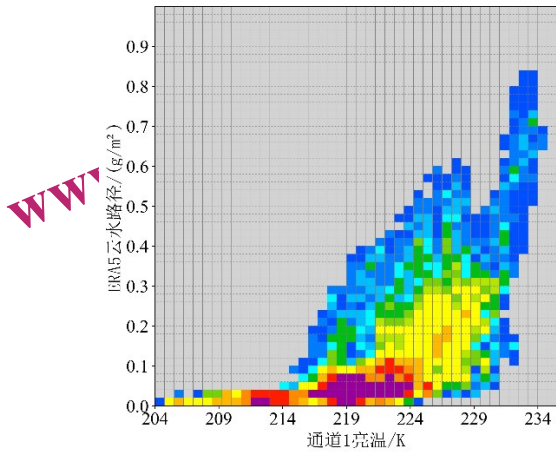


图1 2021年07月20日0000 UTC通道亮温空间分布,图中黑色实线表示台风路径,白色标识表示当前台风中心的位置。  
Fig.1 Spatial distribution of brightness temperature at 0000 UTC on 20 July 2021. The black solid curve denotes the typhoon track from best-track data, and the white symbol marks the current typhoon center.

为定量分析GeoMWS各通道1-4/8/11的亮温与CLWP之间的关系,图2给出了2021年7月20日0000 UTC时段、 $20^{\circ} - 30^{\circ}N$ 区域内各通道亮温与CLWP的散点分布特征。由图2(a-b)可见,通道1-4的高温都随着CLWP增多而增加,二者之间呈现较为明显的线性关系,说明这些通道对云水含量具有较好的敏感性。但是这里的线性关系存在较大的不确定性,比如图2a中,当亮温大于214 K后,依然有大量资料对应CLWP的零值。而通道3-4亮温与CLWP的线性关系要弱于通道1-2,通道3亮温的低值区对应了大量CLWP大于0的资料。

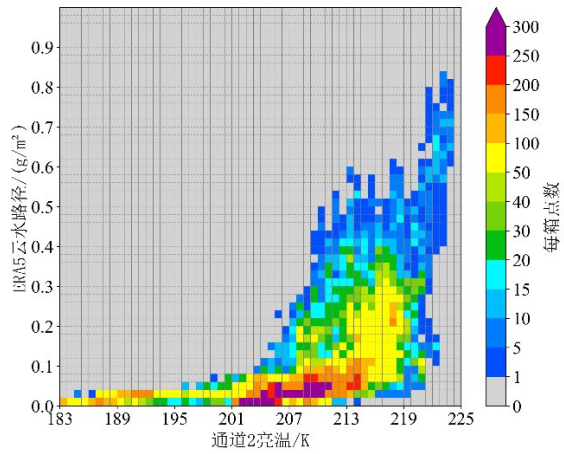
相比之下,图2(e)和图2(f)中通道8和通道11的亮温与CLWP之间的相关性更弱,CLWP随亮温变化幅度较小,未表现出明显的线性规律。

从图2可以看出,亮温对云水路径量值有一定的再现能力,尤其是通道2亮温与云水路径对应关系最好,CLWP大于 $0.2 \text{ g/kg}$ 的资料基本出现在通道2亮温大于207 K的区域,这也表明仅依赖亮温就有可能识别云区资料,但是由于亮温随环境变化而变化,仅依赖亮温量值很难确定不同时刻的云水路径与亮温之间的对应关系。



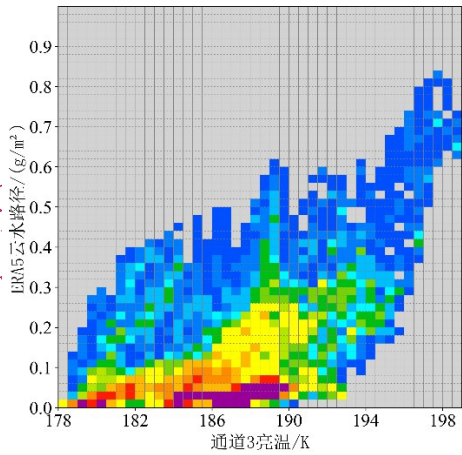
(a) 通道1亮温与ERA5的CLWP的散点分布

(a) Scatter plot of brightness temperature of Channel 1 versus ERA5 CLWP



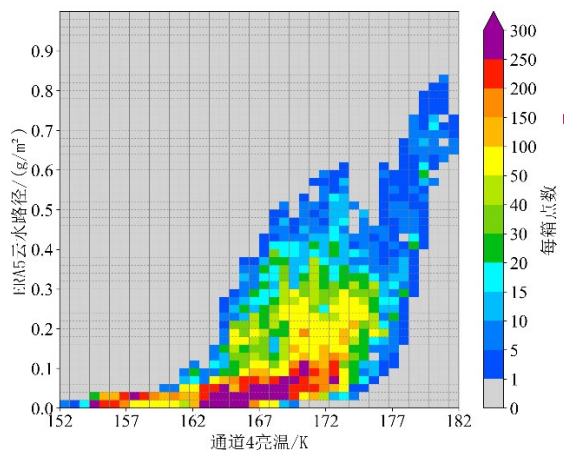
(b) 通道2亮温与ERA5的CLWP的散点分布

(b) Scatter plot of brightness temperature of Channel 2 versus ERA5 CLWP



(c) 通道3亮温与ERA5的CLWP的散点分布

(c) Scatter plot of brightness temperature of Channel 3 versus ERA5 CLWP



(d) 通道4亮温与ERA5的CLWP的散点分布

(d) Scatter plot of brightness temperature of Channel 4 versus ERA5 CLWP

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL  
REMOTE  
SENSING BULLETIN | 遥感学报

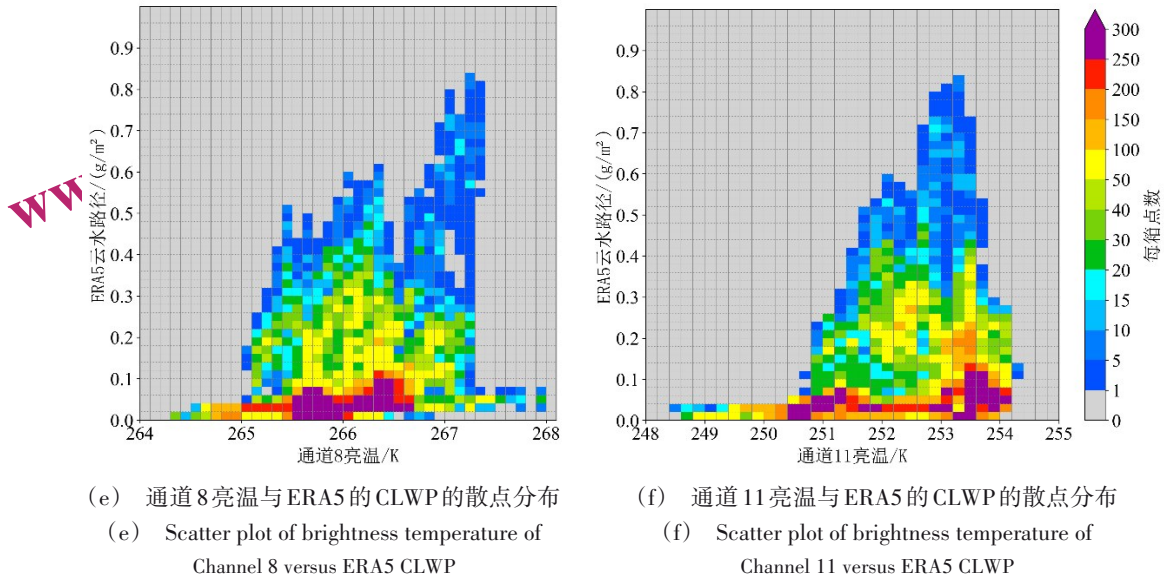


图2 2021年07月20日0000 UTC GeoMWS通道亮温与ERA5 CLWP的散点分布图。

Fig.2 Scatter plots of GeoMWS channel brightness temperature versus ERA5 CLWP at 0000 UTC on 20 July 2021.

利用微波频段的 23.8 GHz 和 31.4 GHz 两个窗区通道亮温对云的反应差异，Weng 等（2003）发展了洋面地区 CLWP 反演算法。这也是资料同化中用于识别洋面云区为资料的重要方法，通常将 CLWP 大于 0.02 g/kg 视为云区资料（Weng 和 Grody, 2009）。GeoMWS 也设定了通道频率 23.8 GHz 和 31.4 GHz 的窗区通道，研究首先尝试使用 CLWP 反演方法进行云检测，利用频率为 23.8 GHz 和 31.4 GHz 通道的观测亮温，使用前人建立的 CLWP 物理反演方法：

$$L = a_0 \mu \left[ \ln(T_s - T_{b31}) - a_1 \ln(T_s - T_{b23}) - a_2 \right] \quad (1)$$

其中：

$$a_0 = -0.5 \kappa_{v23} / (\kappa_{v23} \kappa_{l31} - \kappa_{v31} \kappa_{l23}) \quad (2)$$

$$a_1 = \kappa_{v31} / \kappa_{v23} \quad (3)$$

$$a_2 = -2.0 (\tau_{o31} - a_1 \tau_{o23}) / \mu + (1.0 - a_1) \ln(T_s) + \ln(1.0 - \varepsilon_{31}) - a_1 \ln(1.0 - \varepsilon_{23}) \quad (4)$$

$\mu$  为局部天顶（极）角的余弦， $\varepsilon$  和  $T_s$  分别为海表发射率和海面温度， $\kappa_v$  和  $\kappa_l$  分别是水汽和云液态水的质量吸收系数。在瑞利近似下，可以将液态水质量吸收系数  $\kappa_l$  为云温  $T_l$ （°C）的函数：

$$\kappa_l = a_l + b_l T_l + c_l T_l^2 \quad (5)$$

氧气光学厚度  $\tau_o$  可被参数化为海面温度  $T_s$  的函数：

$$\tau_o = a_o + b_o T_s \quad (6)$$

图3展示了不同来源的 CLWP 空间分布情况。

图3a为ERA5再分析资料的 CLWP 结果，作为真值参考。该时刻正值台风“烟花”影响西北太平洋区域，图中黑线表示台风的最佳路径，白色台风标志为当前时刻的台风中心位置。可以看到，台风附近区域被 CLWP 的高值区所覆盖，螺旋状的云系结构在 CLWP 场中得到了良好体现。

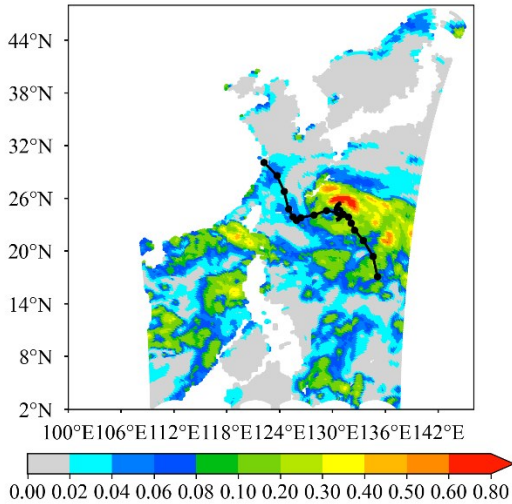
图3b给出了基于通道1与3组合的 GeoMWS 的 CLWP 反演结果。可以看出，反演的云水路径主要集中于 30°N 以北区域，而 30°N 以南大部分区域的 CLWP 值均低于 0.02 g/kg，被判定为晴空状态。这与 ERA5 真值结果差异显著，未能再现台风区域的云水高值特征。为进一步验证反演方法的合理性，图3c给出了同期 ATMS 数据的反演结果。可以看到，ATMS 在菲律宾附近捕捉到明显的云水信号，并在台湾以东区域呈现清晰的高值带（CLWP > 0.02 g/kg），很好地反映了图3a中 CLWP 的空间结构特征。

散射指数也是业务资料同化系统中常用的云检测方法（Benhartz 等，2002），图3e-f分别给出了 ATMS 窗区通道和 GeoMWS 的通道2和4计算的散射指数结果（低频-高频），同样能够一定程度再现 CLWP 真值的结果，但是两个仪器计算的散射指数主要代表了台风周边的深厚云区，对于远离台风区域的云区基本未能很好的再现。

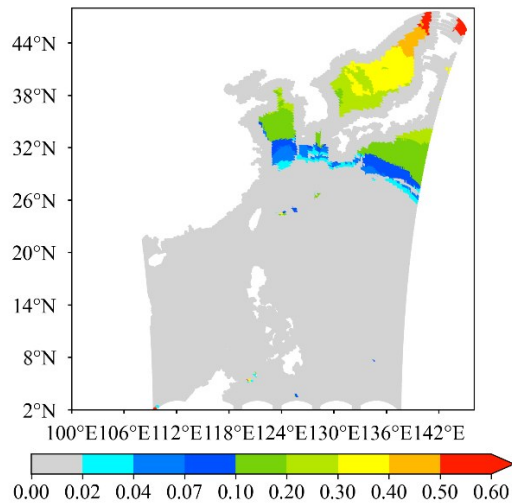
这种差异表明，现有的反演方法在 GeoMWS 的观测条件下并不适用。造成这种结果的一个重要原因在于通道极化方式的差异：GeoMWS 的低频

通道采用了不同的极化配置使得地表发射率增强、反射贡献增加,从而削弱了亮温对云液水吸收的敏感性。此外,GeoMWS的入射角设置与ATMS不同,也导致地表贡献项权重变化,进一步放大了

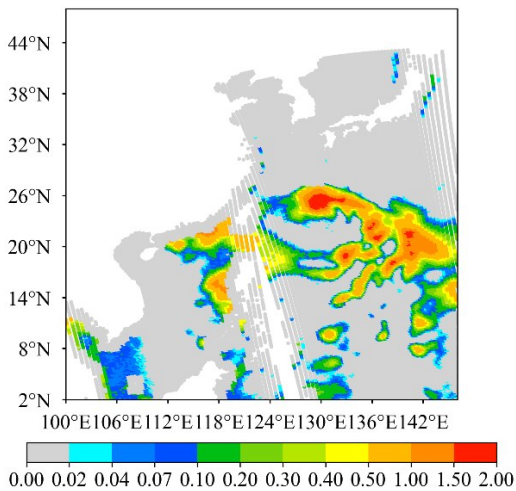
地表辐射对低频通道亮温的影响。这些因素综合作用,使得传统经验公式在反演云水路径时难以准确分离地表与云层信号



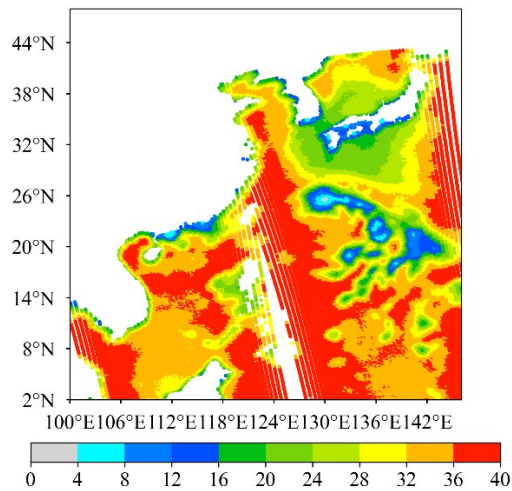
(a) ERA5再分析资料的CLWP  
(a) CLWP from ERA5 reanalysis data



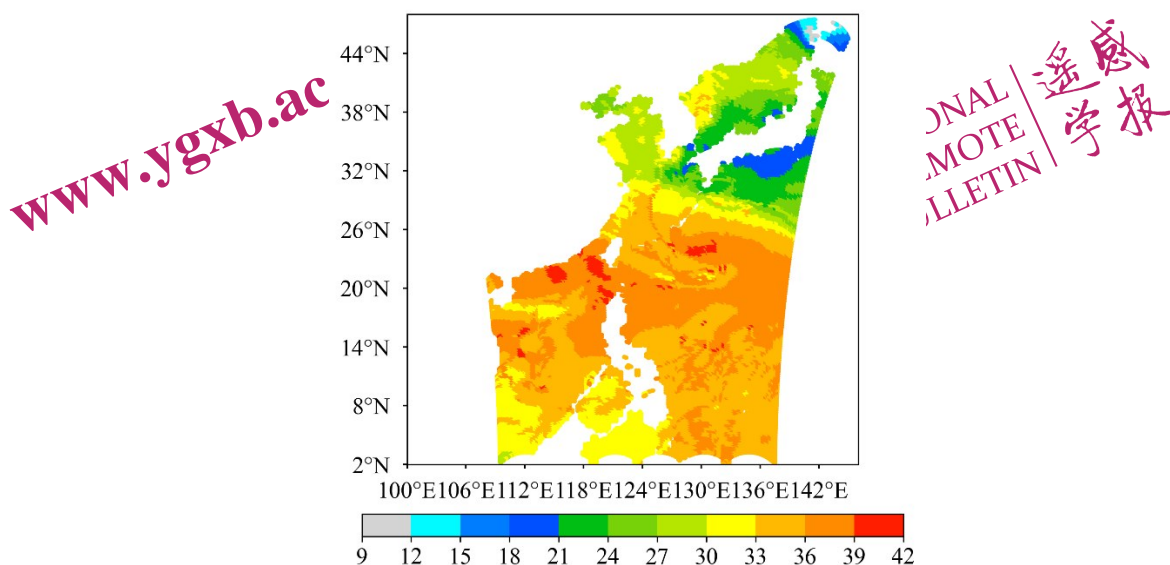
(b) 基于GeoMWS 1、3通道组合的反演的CLWP  
(b) CLWP retrieved from the combination of GeoMWS Channels 1 and 3



(c) ATMS数据反演的CLWP  
(c) CLWP retrieved from ATMS data



(d) 利用ATMS窗口通道计算的散射指数  
(d) Scattering index calculated using ATMS window channels



(e) 利用GeoMWS数据计算的散射指数

(e) Scattering index calculated using GeoMWS data

图3 2021年7月20日0000 UTC的不同云相关数据的空间分布图。图(a)中的黑线表示best-track数据的台风“烟花”路径,黑色台风符号标示当前台风中心位置。

Fig.3 Spatial distribution of different cloud-related data at 0000 UTC on 20 July 2021. The black line in panel (a) denotes the track of Typhoon In-Fa from best-track data, and the black typhoon symbol marks the current location of the typhoon center.

#### 4 基于通道间亮温变率的云检测方法

虽然旧反演方法不能直接应用于GeoMWS资料,但是从上述分析中可以知道,各通道亮温对云的反应有明显差异。然而,亮温易受大气环境影响,致使单一阈值方法难以具备普适性。因此,这里尝试依据亮温的通道间变率,建立一个稳定且客观的标准,以判定观测数据是否为云区观测资料。且基于图2的分析结果,这里引入经验性调整后的通道2和通道4亮温来代表局地温度。为增强该指数对极端温度的灵敏度,进一步采用e指数函数对温度项进行加权修正,从而构建出一个具有较强时空一致性,能有效区分云与晴空条件的云检测指标,最终构建出一个具有时空一致性的云检测指数:

$$Index1 = \frac{\mu}{T_{b,4}/10} \quad (7)$$

$$Index2 = \frac{\sigma}{e^{\left(\frac{T_{b,2}-200}{50}\right)}} \quad (8)$$

其中,  $T_{b,i}$  为GeoMWS中通道3-8、11的模拟亮温,  $\mu$  和  $\sigma$  是这七个通道的观测亮温的平均值和标准差,即:

$$\mu = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 T_{b,i}, \sigma = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 (T_{b,i} - \mu)^2} \quad (9)$$

图4展示了所定义的两个云检测指数的空间分布及其与CLWP真值的散点图。图4a为指数1的空间分布图,该指数在台湾东部区域存在大片螺旋状低值区,在台湾东南部形成一个圆形低值区,菲律宾群岛的东西两侧也存在大片的低值区,可以看到低值区的结构与台风的螺旋雨带有很好的相似性。最优路径数据显示该时刻台风位于(130.7°E, 24.5°N),图3a的CLWP结果显示在台风周边地区存在大量的CLWP大值区,证明了指数1的低值区与台风区的云系有很好的对应关系。但是在28°N以北的高纬度地区,指数1表现为一致的高值区,这与图3a中日本海北部CLWP大值区对应关系较差。

指数2(图4b)同样与台风区云系有很好的对应关系,在台风中心附近、和菲律宾群岛的东、西部及广东沿海海域同样呈现大范围的低值区,与指数1有很好的相似性。但是两个指数也存在一定的差异,指数2在14°N以南地区表现为一致的高值区,表明其在低纬度地区与CLWP对应关系不足,然而在纬度较高的日本海北部沿岸存在一片低值区,这与图3a中CLWP的高值区有很好的对

应关系。综合两个指数结果可以发现, 两个指数具有相似性和互补性, 在区域中部, 两个指数与CLWP的高值区都有很好的对应关系, 但是指数1能够更好的表现出低纬地区的CLWP大值, 指数2则是在高纬度地区识别效果较好。

为了定量的评估两个指数与CLWP的关系, 图4c-d还给出了两个指数与CLWP的散点图, 图中

颜色代表该区间的观测资料量。两个指数都是表现为随CLWP的增加呈显著下降趋势, 但是下降趋势有明显的非线性特征, 指数较大的区域基本对应了接近0值的CLWP, 但是当指数小于某一个阈值后, 对应的CLWP值出现爆发性的增大。这就表明如果能够确定合理的阈值, 就可以根据指数的量值区分有云和晴空区。

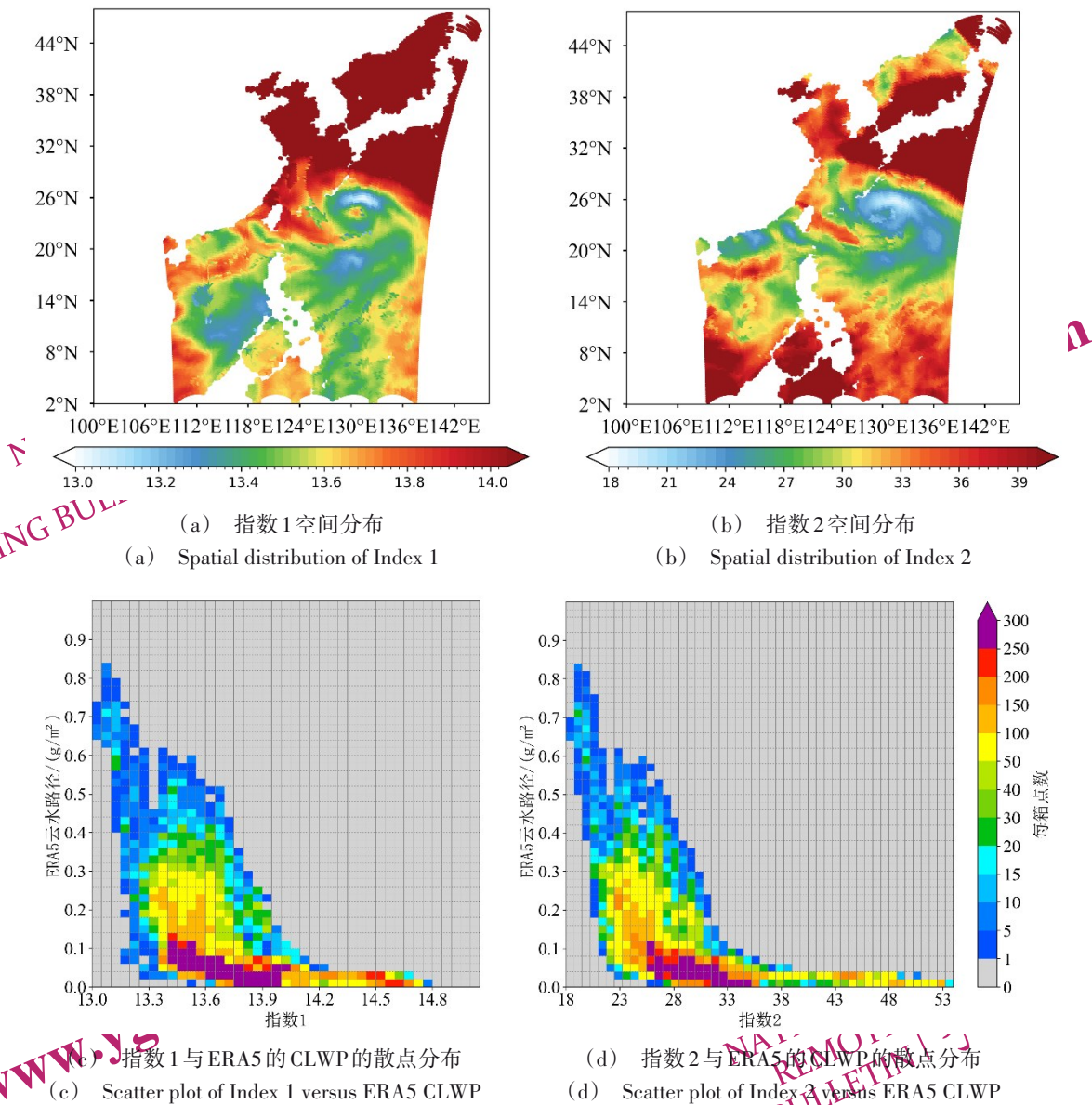


图4 2021年07月20日0000 UTC 指数空间分布及其与ERA5的CLWP散点关系。

Fig.4 Spatial distribution of the index and its scatter relationship with ERA5 CLWP at 0000 UTC on 20 July 2021.

静止微波星垂直探测仪的波段配置丰富, 能结合不同波段的敏感性差异, 可以实现更为全面的云检测效果。但本研究主要关注静止微波星垂直探测仪温度探测波段辐射亮温资料的同化应用。

云对亮温直接同化应用的影响, 核心源于云区的观测误差与晴空区存在显著差异, 因此需结合云对观测亮温的影响程度, 针对性调整该区域温度探测通道资料的观测误差。由此可见, 本研究中

的云检测目标并非实现云信息的精确反演，而是为同化研究提供关于云影响程度的关键信息。

云检测指数正是反映了云对各个通道亮温的影响特征及通道间影响差异，这里的云包含了水云、冰云以及其他类型云类。目前大部分云区资料同化方法中，并不需要严格区分不同云类的影响。事实上，对于较薄的冰云，比如高空卷云基本不能干扰温度探测通道的亮温，那么在同化应用中该区域的温度探测通道资料就可以认为是晴空资料，这样可以更好的提高温度探测波段资料的同化利用率。所以为了更好的满足温度探测通道的同化研究目标，这里的云检测方法并没有加入水汽波段和太赫兹波段的通道。当然随着资料同化技术的精细化发展和辐射传输模式的不断改进，细致区分不同云类，并精确的模拟各种云类对辐射的影响特征，必然可以进一步提高云区卫星资料的同化效果。因此后续研究中我们将进一步引入水汽探测通道和太赫兹波段的观测信息，从而为同化研究提供更准确的云影响程度信息。

为了更客观的确定有云和晴空区对应的指数阈值，这里引入了三个定量评分来分析不同阈值的有云资料识别能力。分别是检测概率（POD）、误报率（FAR）和命中率（HR）。二元事件（即晴空/云）的POD、FAR和HR定义如下：

$$POD_{cld} = \frac{N_{00}}{N_{00} + N_{10}} \quad (10)$$

$$POD_{clr} = \frac{N_{11}}{N_{11} + N_{01}} \quad (11)$$

$$FAR_{cld} = \frac{N_{01}}{N_{00} + N_{01}} \quad (12)$$

$$FAR_{clr} = \frac{N_{10}}{N_{10} + N_{11}} \quad (13)$$

$$HR = \frac{N_{00} + N_{11}}{N_{00} + N_{01} + N_{10} + N_{11}} \quad (14)$$

对于某一特定事件（例如有云，记为0）， $N_{00}$ 和 $N_{11}$ 分别表示云检测方法和CLWP真值均判定为“有云”和“晴空”的匹配视场（FOV）数量； $N_{01}$ 表示方法判定为“有云”而CLWP真值判定为“晴空”的FOV数量； $N_{10}$ 表示方法判定为“晴空”而CLWP真值判定为“晴空”的FOV数量。

图5展示了指数1在2021年07月16日—25日这10天内0000 UTC、0600 UTC、1200 UTC和1800 UTC四个时刻的云区检测率（ $POD_{cld}$ ）、云区虚警率（ $FAR_{cld}$ ）、报中率（HR）、晴空检测

率（ $POD_{clr}$ ）及晴空虚警率（ $FAR_{clr}$ ）随不同划分标准的折线变化。可以看出四个时刻的各项指标呈现相似的变化趋势，随着指数1取值的增大，晴空检测率（ $POD_{clr}$ ）和晴空虚警率（ $FAR_{clr}$ ）均逐渐下降，而云区检测率（ $POD_{cld}$ ）、云区虚警率（ $FAR_{cld}$ ）及报中率（HR）随之增大。

进一步分析发现，当指数1取值达到13.6时，云区检测率（ $POD_{cld}$ ）和晴空检测率（ $POD_{clr}$ ）基本趋于稳定，变化幅度较小。只是云区虚警率（ $FAR_{cld}$ ）仍偏高，大致接近30%。此外，四个时刻的 $POD_{cld}$ 、HR和 $POD_{clr}$ 曲线均会在同一点发生交汇。报中率（HR）在该阈值之前呈逐渐上升趋势，阈值之后变化趋缓并基本稳定。因此，该交点可作为区分晴空与多云数据的最优阈值。并采用二分法逐时次求解Index1与CLWP的交点，所有时次交点集中分布于13.6附近，我们最终将云检测阈值客观确定为13.6。

图6给出了指数2的结果。指数2的各项指标呈现出与图5相似的变化趋势，即云区检测率（ $POD_{cld}$ ）、报中率（HR）及晴空检测率（ $POD_{clr}$ ）在某一点交汇，同时报中率（HR）在该阈值之前逐渐增大，在阈值之后变化缓慢并趋于稳定。通过二分法计算出各自的交点，各个时刻得出的结果稳定在33附近，该交点阈值最终确定为33，可作为区分晴空与多云数据的最优阈值。

结合图5的分析可知，指数1在中低纬度多云区域的识别效果较好，而指数2在中高纬度多云区域的识别效果更为准确。因此，本研究考虑将两指数联合使用，以提高云检测精度：将指数1 < 13.6且指数2 < 33的区域判定为有云区域，从而提高低纬及高纬度的云区识别能力。

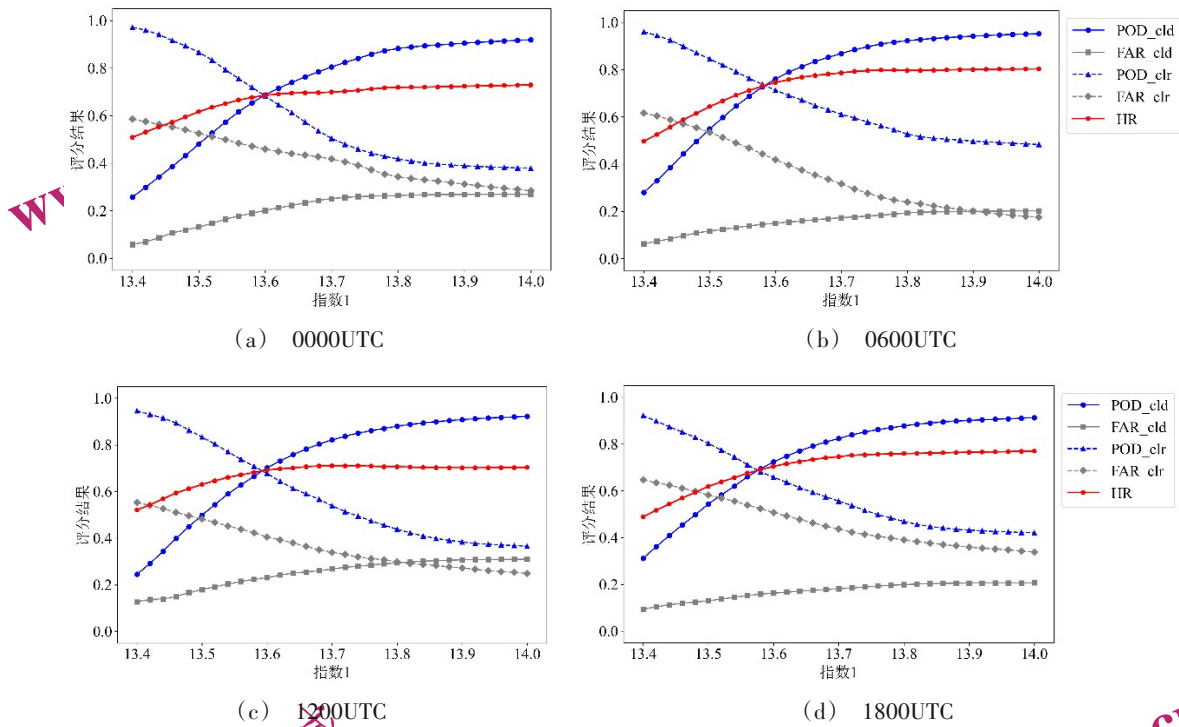


图5 2021年07月16日-25日不同时刻的云区检测率(POD\_cld)、云区虚警率(FAR\_cld)、报中率(HR)、晴空检测率(POD\_clr)、晴空虚警率(FAR\_clr)随指数1的变化曲线。

Fig.5 Variation curves of POD\_cld, FAR\_cld, HR, POD\_clr and FAR\_clr with Index 1 at different times during July 16 - 25, 2021.

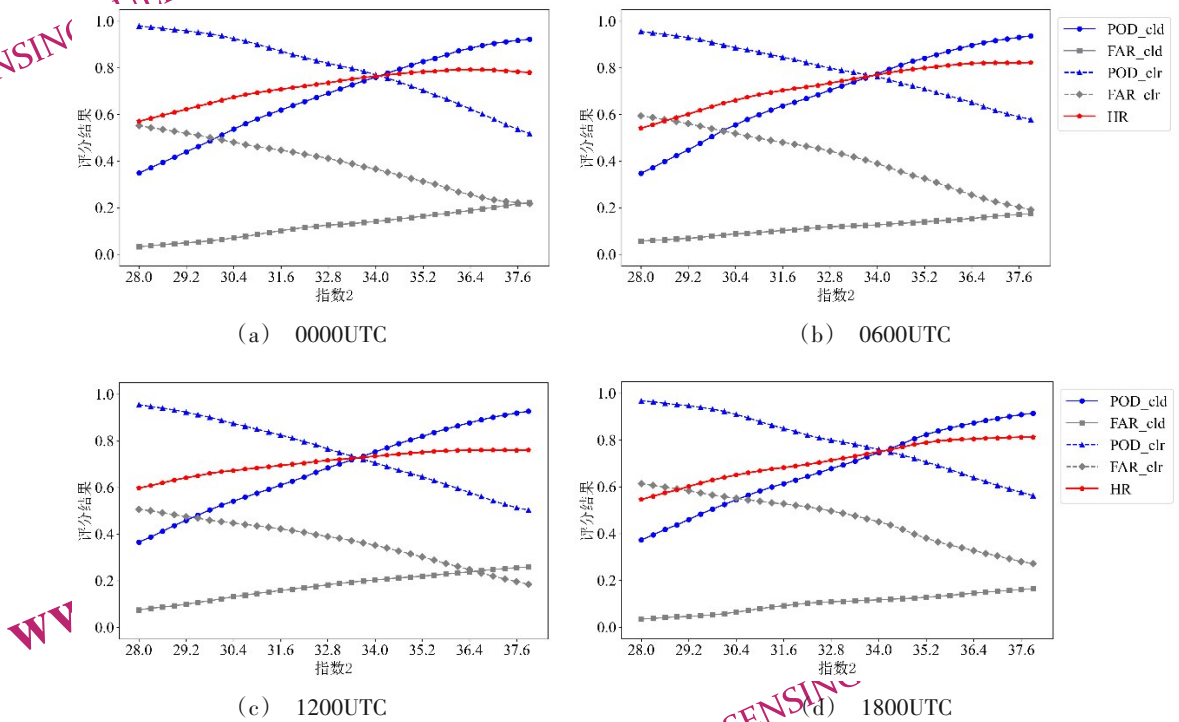


图6 同图5,但是为各评估指标随指数2变化曲线。

Fig.6 Same as Figure 5, but showing the variation curves of each evaluation index with Index 2.

## 5 云检测方法的效果评估

为验证所提出云检测方法的有效性, 这里选择长时间独立时刻资料进行检验。图7给出了2021年7月16日0000 UTC的云检测结果。从图中可以看出, 指数1和指数2均能够较好地表现CLWP真值中的在台风区以及 $8^{\circ}\text{N}$ 以南低纬度地区的大面积多云轮廓区域。而且这两个指数有很好的互补性, 在高纬度区域, 通过指数2的识别, 可弥补指数1在 $26^{\circ}\text{N}$ 以北表现出大于14的高值区域中未能准确识别的云区; 而在低纬度区域, 指数1的识别能力能够弥补指数2在 $8^{\circ}\text{N}$ 以南大于36的高

值区域中存在的盲区。只是该时刻日本海以北沿岸的部分有云区仍未被完全识别, 这可能是受到混合下垫面的影响, 但是海南南部、东部及菲律宾西部的晴空区域得到了准确判定, 同时渤海沿岸的云水区也被正确识别。

综合来看, 指数2可识别高纬度的有云区域, 而指数1能够准确反映低纬度的多云区域, 两者结合使用可有效识别日本海以北沿岸的有云区, 并同时判定海南南部及 $8^{\circ}\text{N}$ 以南的晴空区域。上述结果充分证明了所提出云检测方法在不同纬度的有效性。

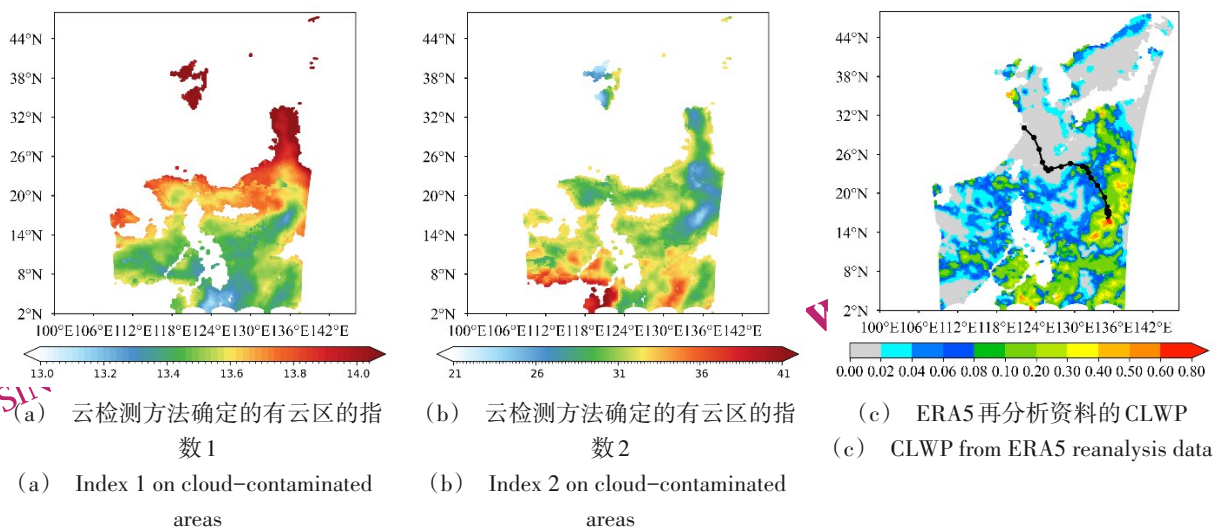


图7 2021年07月16日0000 UTC云检测的结果分析对比。

Fig. 7 Analysis and comparison of cloud detection results at 0000 UTC on 16 July 2021. identified by the cloud detection method identified by the cloud detection method

由于检测是基于固定的阈值, 不同季节的适应性就成为实际应用中需要重点关注的问题。为了明确新建云检测方法的普适性, 这里还另外准备了2021年的冬季1月1-5日的仿真资料, 并利用同样的阈值进行了云检测效果分析。图8给出了1月3日1800 UTC时刻的两个指数经过云检测检测出的有云区的空间分布图, 同时给出了该时刻ERA5云水路径作为真值参考数据。从空间分布的对比可以看出, 云检测指数很好的再现了主要的云水路径大值区, CLWP极值区出现在东海及其东部海域, 大片区域的CLWP超过了 $0.4\text{ g/kg}$ , 两个指数在该区域都出现了明显的低值区, 另外一个CLWP大值区是在南海西北部, 两个指数都表现出低值的分布特征。但是两个指数都未能很好的

再现日本海东北部的小范围CLWP低值区, 这可能意味着云检测也一定程度受到亮温量值的影响, 后续研究中如何进一步消除亮温影响也是提高云检测精度的研究目标。

为明确云检测方法的稳定性, 图9给出了冬季和夏季两个时间段新建云检测方法逐6小时的有云检测率(POD\_cld)、有云虚警率(FAR\_cld)及报中率(HR)。作为对比, 这里同时给出了散射指数的检验结果, 散射指数的阈值经验性的设定为39。结果显示, 新云检测方法在所有时刻的有云检测率(POD\_cld)基本大于0.85, 表明该方法能够稳定识别绝大部分云区观测资料。报中率(HR)平均值也超过0.75, 虚警率(FAR\_cld)大部分时间都是在0.2以下。但是散射指数的检出率

仅能维持在0.6, 虚警率也普遍高于0.2, 冬季则是可以达到0.3以上。虽然降低散射指数阈值可以进

一步提高检出率, 但是过高的虚警率也降低了散射指数的实际应用价值。

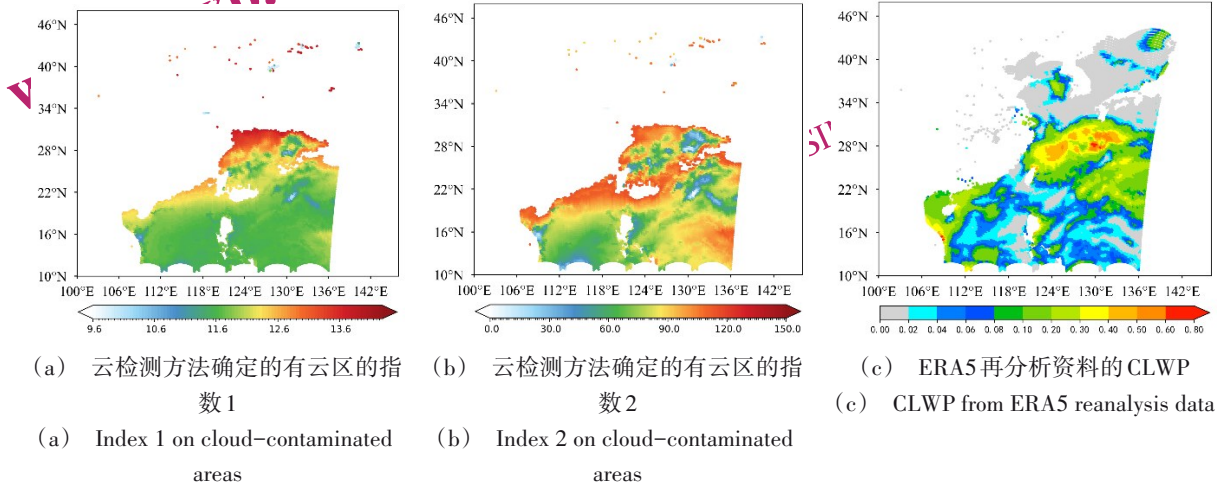


图8 2021年1月3日1800 UTC时刻云检测的结果分析对比。

Fig. 8 Analysis and comparison of cloud detection results at 1800 UTC on 3 January 2021. identified by the cloud detection method identified by the cloud detection method

冬季云检测效果评估结果充分证明了新建云检测方法具有很好是时间和空间普适性, 当然从物理机制上明确云检测方法的通用性更为重要。新建云检测指数的物理基础是利用了云对不同频率辐射亮温的影响的相对差异性, 云检测指数主要反映了该视场内因为云影响导致的通道之间亮温差值的变化情况。云检测是在单个时刻的单个视场内进行, 该视场内多通道平均亮温与大气温度变化有很好的对应关系, 而大气温度变化正是不同区域和季节云检测差异性的主要来源。云检测方法首先通过计算多通道平均亮温和标准化亮温, 较大程度的消除了该视场多通道平均亮温的信息。其次, 较高的大气温度往往容易增大亮温通道间的差异量值, 为了进一步消除平均温度对亮温通道间变率的影响, 研究选用了两个窗区通道亮温来引入地面温度的实时信息, 通过增加这两个通道亮温作为分母, 进一步消除大气温度变化的影响。从上述两个方面, 云检测指数尽可能的消除了大气温度的影响, 从而保证云检测方法的精度不受地区和季节差异的影响, 提高了云检测方法的时间和空间普适性。

www.ygxb.ac.cn

NATIONAL REMOTE SENSING BULLETIN | 遥感学报

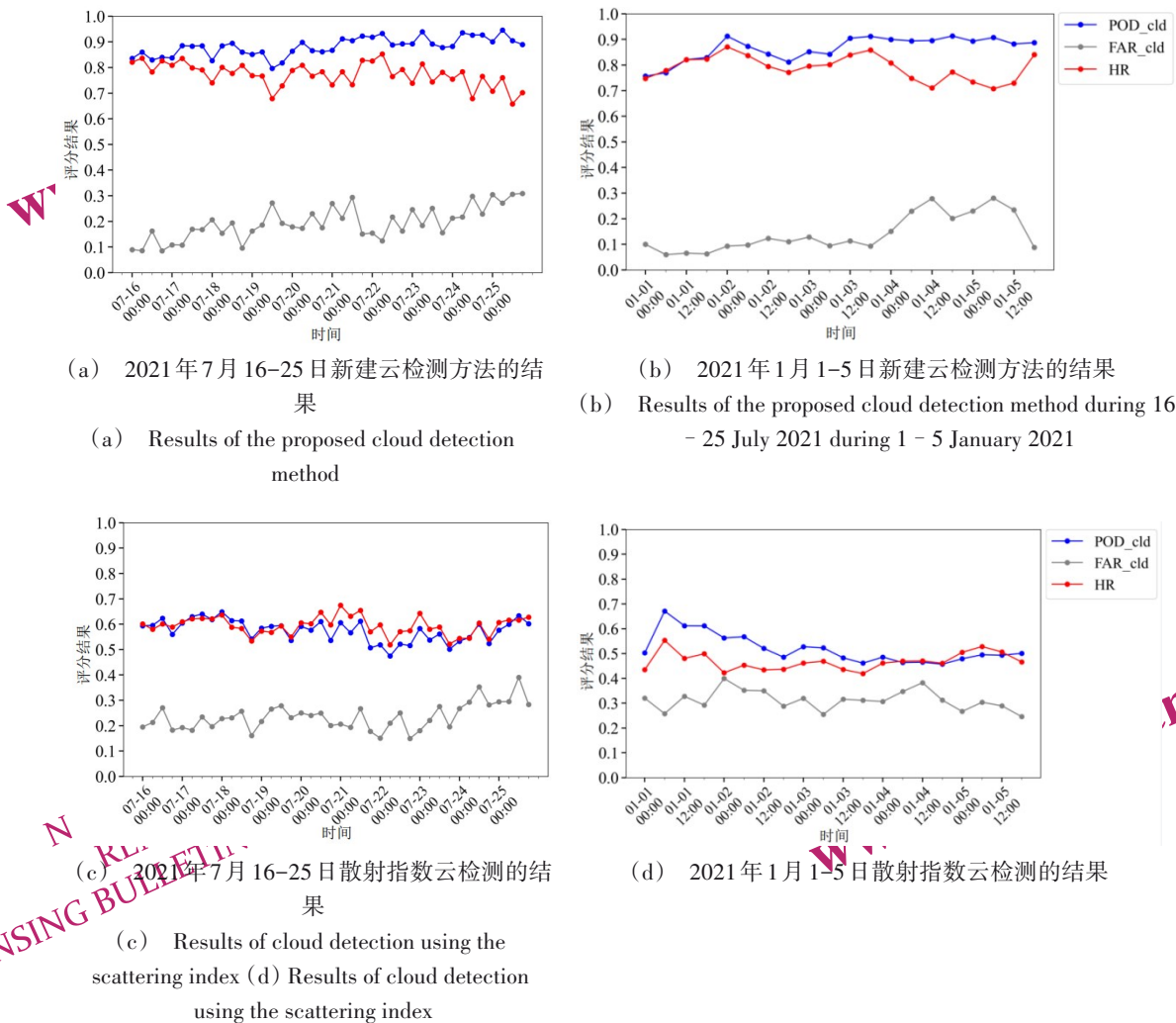


图9 2021年7月16-25日(左列)和1月1-5日(右列)逐6小时云检测率(POD\_cld)、虚警率(FAR\_cld)及命中率(HR)随时间变化曲线。

Fig.9 Time series of the POD\_cld, FAR\_cld, and HR for cloud detection at 6-hourly intervals during 16-25 July 2021 (left panels) and 1-5 January 2021 (right panels).

## 6 总结

静止轨道微波气象卫星在监测台风、暴雨等快速发展的强对流天气系统方面具有独特优势。凭借较强的穿透能力，静止轨道微波卫星能够对大气温度、湿度等气象要素进行全天候、全时段、全覆盖的高频三维探测。前人基于 23.8 GHz 和 31.4 GHz 窗区通道的 CLWP 反演算法和散射指数方法并不能满足 GeoMWS 有云资料的准确识别。静止微波垂直探测仪具备丰富的波段配置，可利用不同波段对云敏感性的差异，实现更为全面的云检测。且 GeoMWS 的通道 2 在低云或边界层云的识别中对地表背景差异具有更高响应度，以及通道 4

对厚云与降水云的响应较强，利用该特征，本研究提出了一种基于两个窗区通道（通道 2 和通道 4）的云检测方法。该方法充分考虑两通道在高低纬度地区的敏感性，并通过亮温标准化尽可能消除温度变化的影响，从而适用于静止轨道微波探测卫星——风云四号微波星垂直探测仪 (GeoMWS)。结果表明，新方法在各时刻的所有时刻的有云检测率 (POD\_cld) 均大于 80%，表明该方法能够稳定识别绝大部分云区观测资料。报中率 (HR) 平均值也超过 75%，虚警率 (FAR\_cld) 大部分时间都是在 20% 以下。对比散射指数的检出率仅能维持在 60% 附近且虚警率也达到了 20% 以上，新方法更为优越。

尽管目前尚无搭载微波仪器的静止轨道卫星投入业务运行, 基于模拟数据的应用技术研究可为未来实际应用奠定基础。新的云检测方法不仅可为晴空与有云区资料同化提供更精确的云检测信息, 还可进一步提升静止微波卫星资料的同化效果。需要指出的是, 本研究依赖于仿真数据, 模拟数据难以完全再现真实仪器误差及太空复杂观测环境。未来工作应结合大量实际观测数据, 对算法进行进一步完善、验证与优化。

**志 谢** 此项目由自然科学基金(编号: U2442218和42375004)和海南黎安教育科技创新联合项目(编号: ZDYF2025(LALH)005)联合资助, 在此表示衷心的感谢!

## 参考文献(References)

- Bennartz R, Thoss A, Dybbroe A and Michelson D B. 2002. Precipitation analysis using the Advanced Microwave Sounding Unit in support of nowcasting applications. *Meteorological Applications*, 9(3): 177-189 [DOI: 10.1017/S1350482702002037]
- Bi Y M, Yang J, Wei C Y, Dou F L, Xu W W, An D W, Luan Y H, Feng J F and Zhang L C. 2024. Atmospheric temperature measurements using Microwave Hyper-spectrum from Geostationary Satellite: band design, weighting functions and information content. *Remote Sensing*, 16(2): 289 [DOI: 10.3390/rs16020289]
- Bi Y M, Yang J, Dou F L, H Y, Wang J C, Li X Q, Xu R H, Hu J Y, Liao M and Zhang D J. 2025. Atmospheric sounding capability analysis and observation simulation of the Fengyun-4 Geostationary Microwave Satellite. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 49(4): 1020-1029 (毕研盟, 杨军, 窦芳丽, 韩阳, 王嘉琛, 李小青, 徐榕焯, 胡菊阳, 廖蜜, 张德军. 2025. 静止轨道微波卫星大气探测能力分析和观测仿真. *大气科学*, 49(4): 1020-1029 [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2506.25071])
- Chen K, Suo Z H, Han W and Cai B W. 2024. OSSEs on the FY-4M Geostationary Microwave Satellite based on CMA-GFS and CMA-MESO. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 1-19 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3487859]
- Chen Y and Cao C Y. 2024. Estimation of AMSU-A and MHS antenna emission from MetOp-A end-of-life deep space view test. *Remote Sensing*, 16(2): 299 [DOI: 10.3390/rs16020299]
- Christensen J, Carlstrom A, Ekstrom H, Emrich A, Embretsen J, Maagt P and Colliander A. 2007. GAS: The geostationary atmospheric sounder//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE: 223-226 [DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4422770]
- Cui M Y, Ji D B, Jia L, Zheng C L and Jiang W G. Research on a real-time precipitation recognition method based on geostationary satellite observation data. *Remote Sensing Technology and Application*, 39(4): 1000-1012 (崔梦圆, 姬大彬, 贾立, 郑超磊, 蒋卫国. 2024. 一种基于静止卫星观测数据的实时降水识别方法研究. *遥感技术与应用*, 39(4): 1000-1012 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2024.4.1000])
- Dong P M, Huang J P, Liu G Q and Zhang T. 2014. Assimilation of FY-3A microwave observations and simulation of brightness temperature under cloudy and rainy condition. *Journal of Tropical Meteorology*, 30(2): 302-310 (董佩明, 黄江平, 刘桂青, 张田. 2014. FY-3A微波探测资料的直接同化应用及云雨条件下的亮温模拟. *热带气象学报*, 30(2): 302-310)
- English S J, Renshaw R J, Dibben P C and Eyre J R. 1997. The AAPP module for identifying precipitation, ice cloud, liquid water and surface type on the AMSU-A grid//The 9th International TOVS Study Conference. Igl: ECMWF :119-130
- Eyre J R, English S J, Forsythe M. 2020. Assimilation of satellite data in numerical weather prediction. Part I: The early years. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(726): 49-68 [DOI: 10.1002/qj.3654]
- Gasiewski A J, Barrett J W, Bonanni P G and Staelin D H. 1990. Aircraft-based radiometric imaging of tropospheric temperature and precipitation using the 118.75-GHz oxygen resonance. *Journal of Applied Meteorology*, 29(7): 620-632 [DOI: 10.1175/1520-0450(1990)0292.0.CO;2]
- Geer A J, Bauer P and English S. 2012. Assimilating AMSU-A temperature sounding channels in the presence of cloud and precipitation. Technical Report 24, EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report, URL <https://www.ecmwf.int/node/9513>.
- Grody N, Zhao J, Ferraro R, Weng F Z and Boers R. 2001. Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA 15 advanced microwave sounding unit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D3): 2943-2953 [DOI: 10.1029/2000JD900616]
- Guerbette J, Mahfouf J F and Plu M. 2016. Towards the assimilation of all-sky microwave radiances from the SAPHIR humidity sounder in a limited area NWP model over tropical regions. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68(1): 28620 [DOI: 10.3402/tellusa.v68.28620]
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horanyi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146: 1999-2049 [DOI: 10.1002/qj.3803]
- Lambriksen B, Wilson W, Tanner A, Gaier T, Ruf C and Piepmeier J. 2004. GeoSTAR: a microwave sounder for geostationary satellites. *Proceedings of the 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2004)*. Anchorage: IEEE: 777-780 [DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1368517]
- Larosa S, Cimini D, Gallucci D, Paola F D, Nilo S T, Ricciardelli E, Ripepi E and Romano F. 2023. A cloud detection neural network approach for the next generation microwave sounder aboard EPS MetOp-SG a1. *Remote Sensing*, 15(7): 1798 [DOI: 10.3390/

- rs15071798]
- Li J, Qian X L, Qin Z K and Liu G Q. 2022. Direct assimilation of Chinese FY-3E Microwave Temperature Sounder-3 radiances in the CMA-GFS: An initial study. *Remote Sensing*, 14(23): 5943 [DOI: 10.3390/rs14235943]
- Lin Y, Farley R D and Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 22(6): 1065-1092 [DOI: 10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2]
- Liou K N. 2014. Application of radiative transfer principles to remote sensing. *International Geophysics*. San Diego: Academic Press: 348-441 [DOI:10.1016/S0074-6142(02)80022-5]
- Liu L, Weng C S, Li S L, Hu S, Ye J, Dou F L, Shang J. 2020. Review of terahertz passive remote sensing of ice clouds. *Advances in Earth Science*, 35(12): 1211 - 1221 (刘磊, 翁陈思, 李书磊, 胡帅, 叶进, 窦芳丽, 商建. 2020. 太赫兹被动遥感冰云研究现状及进展. *地球科学进展*, 35(12): 1211 - 1221 [DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2020.103])
- Liu S X, Yin Y, Chu Z G and An S. 2020. CDL: A cloud detection algorithm over land for MWHS-2 based on the Gradient Boosting Decision Tree. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 4542-4549 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3014136]
- Lu N M and Gu S Y. 2016. Review and prospect on the development of meteorological satellites. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 832-841 (卢乃锰, 谷松岩. 2016. 气象卫星发展回顾与展望. *遥感学报*, 20(5): 832-841 [DOI:10.11834/jrs320166194])
- Martin G M, Johnson D W and Spice A. 1994. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(13): 1823 - 1842 [DOI:10.1175/1520-0469(1994)0512.0.CO;2]
- McFarquhar G M, Iacobellis S and Somerville R. 2003. SCM simulations of tropical ice clouds using observationally based parameterizations of microphysics. *Journal of Climate*, 16(11): 1643-1664 [DOI:10.1175/1520-0442(2003)016<1643:SSOTIC>2.0.CO;2]
- McNally A P. 2009. The direct assimilation of cloud-affected satellite infrared radiances in the ECMWF 4D-Var. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 135: 1214-1229 [DOI:10.1002/qj.426]
- Pan N, Dong C H and Zhang W J. 2003. The experiments on direct assimilating ATOVS radiances. *Acta Meteorologica Sinica*, 61(2): 226-236 (潘宁, 董建华, 张文建. 2003. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化试验研究. *气象学报*, 61(2): 226-236 [DOI:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.02.008])
- Qin Z K, Wu Z W and Li J. 2020. Impact of the one-stream cloud detection method on the assimilation of AMSU-A data in GRAPES. *Remote Sensing*, 12(22): 3842 [DOI:10.3390/rs12223842]
- Tang F and Zou X L. 2017. Liquid water path retrieval using the lowest frequency channels of Fengyun-3C Microwave Radiation Imager (MWRI). *Journal of Meteorological Research*, 31(6): 1109-1122 [DOI:10.1007/s13351-017-7012-7]
- Wang Y, Kang A F, Cao Y Z and Jiang S C. 2016. Research of real aperture microwave antenna main reflector thermal control measures on Geostationary Earth Orbit. *Aerospace*, Shanghai, 33 (5): 107-113 (王彦, 康奥峰, 曹韞真, 江世臣. 2016. 静止轨道实孔径微波天线主反热控方案研究. *上海航天*, 33(5): 107-113 [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2016.05.017])
- Wang Z Z, Wang W Y, Tong X L, Zhang Z, Liu J Y, Lu H, Ding J and Wu Y T. 2023. Progress in spaceborne passive microwave remote sensing technology and its application. *Chinese Journal of Space Science*, 43(6): 986-1015 (王振占, 王文煜, 佟晓林, 张洲, 刘璟怡, 陆浩, 丁甲, 吴延婷. 2023. 载被动微波遥感技术及其应用进展. *空间科学学报*, 43(6): 986-1015 [DOI:10.11728/cjss2023.06.yg15])
- Weng F Z and Grody N C. 1994. Retrieval of cloud liquid water using the special sensor microwave imager (SSM/I). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 99(D12): 25535-25551 [DOI: 10.1029/94JD02304]
- Weng F Z and Grody N C. 2000. Retrieval of ice cloud parameters using a microwave imaging radiometer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(8): 1069-1081 [DOI:10.1175/1520-0469(2000)0572.0.CO;2]
- Weng F Z, Zhao L M, Ferraro R R, Poe G, Li X F and Grody N C. 2003. Advanced microwave sounding unit cloud and precipitation algorithms. *Radio Science*, 38(4): 806-818 [DOI: 10.1029/2002RS002679]
- Weng F Z, Yu X W, Duan Y H, Yang J and Wang J J. 2020. Advanced radiative transfer modeling system (ARMS): A new-generation satellite observation operator developed for numerical weather prediction and remote sensing applications. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37:131-136 [DOI: 10.1007/s00376-019-9170-2]
- Wu J, Liu H and Zhang C. 2018. CAS-ESA geostationary millimeter wave atmospheric sounder prototype: Drawing up a new blueprint for passive microwave remote sensing development. *Science and Technology Review*, 36 (04): 96-100 (吴季, 刘浩, 张成. 2018. “中欧静止轨道毫米波大气探测仪样”为被动微波遥感领域的发展描绘新蓝图. *科技导报*, 36(04): 96-100 [DOI:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.04.014])
- Wu Z W, Li J and Qin Z K. 2021. Development and evaluation of a new method for AMSU-A cloud detection over land. *Remote Sensing*, 13(18): 3646. [DOI: 10.3390/rs13183646]
- Xie Z C, Li X W, Yao C B, Jiang L F and Li X Q. 2018. Research on geostationary orbit microwave radiometer technology. *Aerospace*, Shanghai, 35(2): 20-28 (谢振超, 李秀伟, 姚崇斌, 姜丽菲, 李向芹. 2018. 地球静止轨道微波辐射计技术. *上海航天*, 35(2): 20-28 [DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.003])
- Zhao L M and Weng F Z. 2002. Retrieval of ice cloud parameters using the advanced microwave sounding unit. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 41(4): 384-395 [DOI: 10.1175/1520-0450(2002)041<0384:ROICPU>2.0.CO;2]
- Zhou F, Qin Z K and Li D Q. 2025. The impact of an improved land cloud detection method on cold-vortex precipitation forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 152(776): e70088 [DOI: 10.1002/qj.70088]

Zhu L J, Qin Z K, Wang J C. 2018. A new cloud detection algorithm based on brightness temperature variation for FY-3C Microwave Humidity Sounder over land. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(3): 434-448 (朱利剑, 秦正坤, 王金成. 2018. 基于亮温通道变率的FY-3C微波湿度计陆地云检测新方法. *气象学报*, 76(3): 434-

448 [DOI: 10.11676/qxxb2018.007])

Zou X, Qin Z and Weng F. 2017. Impacts from assimilation of one data stream of AMSU-A and MHS radiances on quantitative precipitation forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(703): 731-743 [DOI:10.1002/qj.2960]

## Cloud Detection of Simulated Geostationary Microwave Sounding Satellite (FengYun-4/GeoMWS) over Oceans

TAO Huimin<sup>1</sup>, QIN Zhengkun<sup>1</sup>, HAN Yang<sup>2,3</sup>, HU Juyang<sup>4</sup>, BI Yanmeng<sup>4</sup>

1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Earth System Modeling and Prediction Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

3. State Key Laboratory of Severe Weather, Institute of Meteorological, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

4. National Satellite Meteorological Center (National Centre for Space Weather), Beijing 100081, China

**Abstract:** Objective Leveraging the advantage of high-frequency observations, geostationary satellites effectively compensate for the limitations of polar-orbiting meteorological satellites in terms of long revisit cycles and insufficient timeliness in monitoring short-lived severe weather. Compared to infrared bands, microwave radiation is less affected by clouds and exhibits excellent penetration through non-precipitating clouds. Consequently, deploying microwave sounding instruments on geostationary orbits has become a crucial development direction in meteorological observation. The Fengyun-4 Geostationary Microwave Sounder (GeoMWS), currently under development in China, aims to achieve all-weather, all-day, and high-frequency three-dimensional observations of cloud and precipitation systems and their internal structures. This capability is of great significance for monitoring rapidly evolving weather systems and improving Numerical Weather Prediction (NWP). However, a prerequisite for satellite data assimilation (whether clear-sky or all-sky) is the accurate identification of clear-sky and cloudy pixels, along with the assignment of appropriate observation errors. Given that existing cloud detection algorithms are predominantly designed for polar-orbiting satellites and are difficult to directly adapt to the characteristics of geostationary microwave observations, this study aims to develop a specialized cloud detection method for GeoMWS to facilitate the effective assimilation of its data. Method This study proposes a fast and efficient cloud detection algorithm specifically tailored for the GeoMWS instrument. The method constructs a cloud detection index based on two window channels (Channel 2 and Channel 4). It fully accounts for the sensitivity differences of these channels across various latitudinal regions and introduces brightness temperature normalization to eliminate background noise caused by temperature variations. Furthermore, the optimal threshold for the cloud detection index is scientifically determined by analyzing the evolution characteristics of the index under different classification criteria. Result Evaluation results demonstrate that the proposed method achieves robust detection performance across different time periods. The Probability of Detection for clouds (POD\_cld) and the Hit Rate (HR) both exceed 75%, indicating a high capability in identifying cloudy scenes. Meanwhile, the False Alarm Rate for clouds (FAR\_cld) is effectively controlled below 20%. Compared to previous methods applied to this context (which maintain a detection rate of approximately 60%), the proposed method exhibits significant advantages in accuracy. Conclusion This study successfully develops a cloud detection algorithm optimized for GeoMWS. This method not only provides high-precision cloud detection information for data assimilation under both clear-sky and cloudy conditions but also offers reliable theoretical and methodological support for future operational applications. Particularly in critical areas such as typhoon monitoring and NWP data assimilation, it will significantly enhance the application effectiveness of geostationary microwave satellite data.

**Key words:** Geostationary orbit microwave sounding, geostationary microwave sounding, cloud detection over ocean, simulated data

**Supported by** Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants U2442218 and 42375004) and the Hainan Li' an Education, Science and Technology Innovation Joint Program (Grant ZDYF2025(LALH)005)