

LI Jingyang, HE Jieying. Progress and Prospects of the Combined Application of Microwave Remote Sensing and Infrared Hyperspectral Remote Sensing (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 413–423. CSTR:32142.14.cjss.2024-0195. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0195

微波遥感与红外高光谱遥感联合 应用的进展与展望*

李旌阳 何杰颖

(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

摘要 随着地球科学研究的深入,单一遥感技术由于物理机制的限制,难以满足复杂地球系统观测对精度、时空分辨率和数据维度的需求.本研究对微波遥感与红外高光谱遥感的结合应用进行综述,通过分析相关文献,探讨了两种技术的基础原理与特性,总结其在灾害管理和生态环境监测中的应用现状,梳理多传感器融合的技术进展,并分析其面临的主要挑战,包括时空分辨率差异、多传感器校准与数据处理复杂性等问题.研究表明,微波与红外高光谱遥感的融合能够提升观测精度与数据覆盖范围,为气象预报、灾害响应和生态保护提供科学支持.未来需优化融合算法与数据处理技术,推动融合技术向产品化和实际应用转化,为全球气候变化与生态环境研究提供更强大的工具.

关键词 微波遥感, 红外高光谱遥感, 多传感器融合, 地球观测, 数据处理, 时空分辨率, 灾害管理, 生态环境监测

中图分类号 P631

Progress and Prospects of the Combined Application of Microwave Remote Sensing and Infrared Hyperspectral Remote Sensing

LI Jingyang HE Jieying

(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract With the advancement of Earth science research, single remote sensing technologies face limitations in meeting the demands for accuracy, spatiotemporal resolution, and data dimensions in complex Earth system observations. This study reviews the combined application of microwave and infrared hyperspectral remote sensing. Through literature analysis, the fundamental principles and characteristics of both technologies are explored, their applications in disaster management and ecological environment monitoring are summarized, and the progress and challenges of multi-sensor data fusion are exam-

* 攀登计划: 2024 年度青年创新课题资助 (E4PD40013S)

2024-12-24 收到原稿, 2025-03-10 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ined. Challenges include spatiotemporal resolution mismatches, multi-sensor calibration, and data processing complexities. The findings demonstrate that integrating microwave and infrared hyperspectral remote sensing can improve observation accuracy and data coverage, supporting weather forecasting, disaster response, and ecological protection. Future work should focus on optimizing fusion algorithms and data processing techniques to transition from theoretical research to practical applications, providing robust tools for global climate change and environmental studies.

Key words Microwave remote sensing, Infrared hyperspectral remote sensing, Multi-sensor fusion, Earth observation, Data processing, Spatiotemporal resolution, Disaster management, Ecological environment monitoring

0 引言

遥感技术作为观测地球系统的重要手段,在气象、农业、生态环境监测以及灾害管理等领域发挥着至关重要的作用.随着地球科学研究不断深入,该领域对观测精度、时间分辨率以及数据维度的要求日益提高^[1,2].然而,由于物理机制的限制,单一遥感技术往往无法全面满足复杂地球系统观测的需求.这使得多传感器融合逐渐成为遥感技术发展的重要方向^[3,4].

微波遥感具有独特的穿透能力和全天候观测特性,在多云和降雨条件下,微波传感器能够有效穿透云层和降水,对地表和大气进行稳定观测.然而,微波遥感的缺点也非常明显,其空间分辨率通常较低,难以捕捉细节;同时,与红外高光谱载荷通道数量相比,目前在轨微波载荷的频段通道数量相对有限,难以获得类似于红外高光谱细分波段所覆盖的精细信息.

相比之下,红外高光谱遥感以其超高的光谱分辨率和丰富的光谱信息在地物分类^[5]、农业分析^[6]和矿物探测^[7]等领域表现出色.然而,由于受大气影响,红外高光谱遥感对云层高度敏感,在多云天气和降水环境下易受干扰.

鉴于两种遥感技术的局限性和互补性,将微波遥感与红外高光谱遥感结合是提升地球观测能力的重要途径.近年来,关于多传感器融合的研究逐渐增多.尽管微波遥感与红外高光谱遥感的结合显示出广阔的应用前景,但相关研究尚处于起步阶段.一方面,当前的研究更多聚焦于两种技术的独立应用,针对具体问题的协同研究相对较少;另一方面,多传感器数据的融合仍面临挑战,例如时空分辨率的匹配、观测数据的标准化处理以及算法的复杂性等.

本文旨在对微波遥感与红外高光谱遥感结合应

用进行综述:探讨两种遥感技术的基础原理与特性;梳理其结合应用于灾害管理和生态环境监测等领域的现状和进展;分析数据融合技术及其面临的主要挑战;提出未来研究方向并总结本文的主要结论.

1 微波遥感与红外高光谱遥感的互补性

微波遥感和红外高光谱遥感是遥感技术中两种重要的观测手段,各自基于不同的物理原理,能够获取独特的地球系统信息.微波遥感利用电磁波谱中波长较长的微波(0.3~300 GHz)进行观测,其探测机理建立在物体与微波辐射的相互作用理论上^[8].根据瑞利-金斯定律,物体的微波辐射强度与物理温度及发射率呈正相关关系,这种辐射特性为被动微波遥感提供了理论支撑.探测过程遵循辐射传输理论,涉及微波在大气-地表-传感器路径中的吸收、散射、发射和透射过程.得益于微波的穿透特性,该技术具有全天候观测能力,在恶劣天气条件下也仍能提供可靠的观测数据.以被动微波遥感为例,其通过探测目标自然辐射的亮温信息,结合辐射传输方程反演出大气温湿度、土壤湿度、降水强度等参数;而主动微波遥感则通过脉冲发射与回波分析,结合散射矩阵理论获取地表介电常数和结构特征^[9].这些特性使微波遥感特别适合动态环境的观测,如云雨过程^[10]和水文变化^[11].红外高光谱遥感基于电磁波谱中红外波段(0.75~15 μm)的光子-分子相互作用机理,通过连续光谱观测获取目标的光谱反射、吸收或热辐射特性.由于物质的分子振动和旋转特性会在红外波段产生独特的吸收峰,这种指纹效应构成了物质识别的物理基础,使得红外高光谱遥感能够精确识别目标的物质

组成和化学成分,可同时获得目标的几何、辐射和光谱信息^[12].同时,红外高光谱遥感的短波长特性使光学系统具有更高的衍射极限,通常具备较高的空间分辨率,适合地表和大气的精细化观测.目前,较大多数红外高光谱载荷具有比微波遥感载荷更高的空间分辨率,适合地表和大气的精细化观测,这种优势使其在植被健康评估、大气痕量气体探测和矿物分类等领域具有广泛应用^[13].

在实际应用中,微波遥感和红外高光谱遥感技术的特点和差异性也通过具体载荷参数得以体现.搭载于风云三号气象卫星上的第二代微波湿度计(MWHS-II)和红外高光大气垂直探测仪-II型(HIRAS-II)便体现了这一点:MWHS-II是当前微波遥感领域的代表性仪器之一^[14],其工作在多个微波频段,能够通过对大气层中的水汽吸收特性的探测,反演出高精度的大气湿度廓线.MWHS-II强大的云雨穿透能力使其在台风、暴雨等极端天气中依然能够提供稳定的数据,为数值天气预报提供了重要支撑^[15,16];而HIRAS-II则拥有多达3053个通道,波段覆盖3.92~15.41 μm ,利用精细的细分光谱来反演高精度的大气温湿度、臭氧及大气成分廓线,辅助提升数值预报精度.

搭载于高分五号卫星的可见短波红外先进高光谱相机(Advanced Hyperspectral Imager, AHSI)是高空间分辨率红外高光谱遥感的典型载荷,覆盖

400~2500 nm的连续光谱波段,具有强大的光谱信息获取能力.AHSI通过分析物质的光谱吸收峰,能够精确区分不同植被类型、矿物成分以及大气气体成分^[17].AHSI的高空间分辨率使其能够捕捉地表细节,特别适合静态环境的精细化观测.

在海外载荷方面,索米国家极地轨道伙伴卫星(National Oceanic and Atmospheric Administration Suomi-National Polar-orbiting Partnership, NOAA SNPP)搭载的先进技术微波探测仪(Advanced Technology Microwave Sounder, ATMS)也是微波遥感领域的重要仪器,具有22个通道,工作频率覆盖23.8~183 GHz,可在极端天气条件下更好地捕捉低层大气的热结构,提供更详细的热带气旋和对流降水数据^[18].表1和表2给出了这些载荷的具体信息.

通过这些微波和红外高光谱代表性载荷参数,可以明显发现二者在穿透性和空间分辨率上的差异.这些差异性为微波遥感和红外高光谱遥感带来了独特的领域优势,但同时也为联合应用时的互补带来了可能性:在观测波长、目标、空间分辨率和信息维度上的互补性,使得二者的结合可以显著提高遥感观测的广度和深度.首先,在波长上,微波遥感使用的长波能够穿透云层和降水层,特别适合动态大气过程和大气湿度观测;而红外高光谱遥感则利用短波段提供丰富的光谱信息,对物质组成和成分的精细分析具有不可

表 1 代表性微波载荷参数

Table 1 Specifications of representative microwave instruments

参数	MWHS-II	ATMS
频率范围/GHz	89~183	23.8~183
通道数	15	22
空间分辨率/km	15 (166, 183 GHz) 30 (89, 118 GHz)	16 (165~183 GHz) 32 (50 ~ 90 GHz) 75 (23~32 GHz)

表 2 代表性红外高光谱载荷参数

Table 2 Specifications of representative infrared hyperspectral instruments

参数	HIIRS-II			AHSI	
	LWIR	MWIR	SWIR	VNIR	SWIR
波长范围/ μm	15.41~8.55	8.56~5.20	5.21~3.92	0.4~1.0	1.0~2.5
通道数	834	1207	1012	150	180
空间分辨率		14 km			30 m

替代的作用. 这种波长互补使得两者结合在复杂天气条件下能够提供更全面的观测. 其次, 二者的观测目标具有显著的互补性: 微波遥感主要关注目标的物理性质 (如介电常数、湿度), 而红外高光谱遥感则关注化学组成 (如气体浓度、矿物种类)^[19,20]. 此外, 空间分辨率上的互补性同样显著: 微波遥感通常具有较低的空间分辨率, 适合大范围监测; 而红外高光谱遥感凭借其高空间分辨率, 能够对局部区域进行详细分析. 结合两者数据, 可同时实现宏观监测和微观解析. 进一步而言, 红外高光谱遥感数据凭借其米级空间分辨率, 可辅助优化微波遥感数据的千米级空间分辨率, 从而弥补微波遥感分辨率较低的不足 (见图 1^[21]).

当前, 静止轨道红外高光谱遥感技术已实现业务化观测应用, 而微波遥感载荷的研制仍主要停留在理论验证与样机阶段, 并无业务化应用. 由于轨道高度带来的限制, 现有静止轨道微波试验载荷的空间分辨率仅达数百公里量级, 较近地轨道同类载荷存在数量级差距^[22]. 鉴于此, 在静止轨道微波载荷实现业务化运行前, 二者协同观测可突破单一载荷的时空分辨率限制, 通过多源数据融合显著提升对大气垂直结构及地表特征的连续监测能力, 这种技术组合为复杂地球系统的全天候立体精细化监测开辟了新的路径. 综上所述, 微波遥感和红外高光谱遥感在技术特点和互补性上各具特色, 二者的结合显著增强了遥感技术的综合观测能力, 在农业监测、灾害管理和气候变化研究等领域展现出广泛的应用潜力.

2 微波与红外高光谱联合的典型应用

遥感数据的联合拥有多个层面, 其应用层面主要包括数据类型、空间、时间、层次、模型和多源信息融合等方面. 数据类型层面的联合应用通过融合来自不同传感器的多种数据类型, 能够充分发挥各类遥感数据的优势; 空间层面的联合应用关注不同空间分辨率和观测视角的数据融合, 如通过重采样和插值方法, 可以扩展微波遥感数据的空间分辨率, 从而与高分辨率的红外高光谱数据进行匹配, 增强融合结果的细节信息; 时间层面的联合应用则侧重于不同时间尺度的数据融合, 这对于动态变化过程的追踪和预报至关重要; 层次层面的联合应用则是针对多层次的环境监测需求, 提升对于垂直分辨率的理解; 模型层面的数据联合通过将多种数据源输入同一个数值模型, 或者在不同模型之间进行数据融合; 多源信息融合层面强调从多个信息源获取数据, 通过优化算法对不同来源的数据进行整合, 这种方法能够提高结果的精确性与可靠性, 尤其是在需要综合考虑多个因素 (例如气象、环境、土壤等) 的复杂问题中, 如基于成像原理, 利用辐射传输模型和反演算法进行联合处理, 可以有效地将微波遥感与红外高光谱遥感的数据进行物理一致性调整, 提升反演结果的准确性. 此外, 基于机器学习和深度学习的方法能够从微波与红外高光谱数据中提取更多重合特征, 提高分类精度和物体识别能力, 进一步优化地球观测的效果. 目前, 各个层面的典型

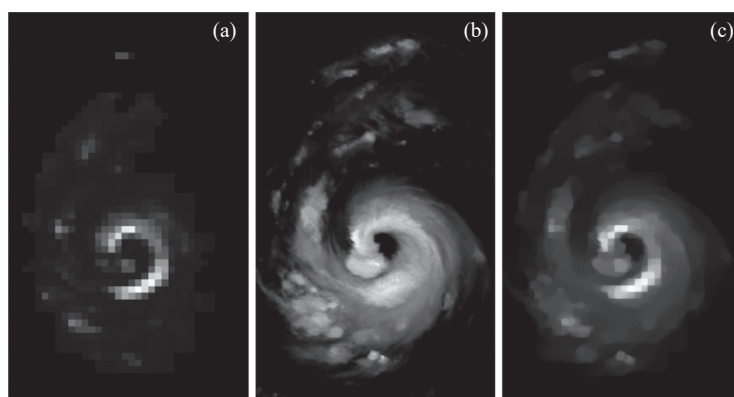


图 1 (a) 15 km 分辨率微波仪器 Advanced Microwaved Sounding Unit-B (AMSU-B) 图像, (b) 1.9 km 分辨率红外高光谱仪器 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) 图像, (c) 数据融合结果

Fig. 1 (a) AMSU-B image with 15 km resolution, (b) AVHRR image with 1.9 km resolution, (c) data fusion result with 1.9 km resolution

联合应用主要集中在大气和地表监测两个独立领域,鲜有同时融合这两个领域进行综合分析,即更大层次层面的联合。尽管如此,这些联合应用已充分发挥了不同遥感数据的优势,并在提升监测精度和时效性方面取得了显著进展。接下来的讨论将基于现有研究成果,进一步总结和分析这些联合应用在大气与地表监测中的实际优化效果。

2.1 在大气过程中的应用

微波遥感凭借其其对大气中粒子敏感的特性以及良好的云雨穿透能力,长期以来被广泛应用于大气过程的观测,涵盖气候与天气系统的多种变化,尤其在天气预报和模式修正中表现突出。然而,随着对大气过程研究的深入以及数值天气预报对时间和空间分辨率需求的提高,单一遥感技术的局限性逐渐显现^[23]。近年来,微波遥感与红外高光谱遥感的联合应用受到越来越多的关注,其在数值天气预报及极端天气事件监测预警中的协同优势逐渐被探讨和验证^[24,25]。数值天气预报的精细化能力在很大程度上依赖于观测数据的质量和覆盖范围,两者在观测目标上的互补性使其在数值天气预报数据同化中展现了独特优势。

在降水预测领域,红外高光谱遥感的直接应用受到一定限制,其对云顶参数的精确反演虽然为降水研究提供了关键数据^[26],但是由于其对云雨层的穿透能力有限,在强降水区域的观测效果较弱。相比之下,微波遥感因其能够穿透厚云层直接观测降水强度和云水含量,在降水监测中具有显著优势。将微波遥感和红外高光谱遥感的数据联合使用可以有效弥补各自的不足。在21世纪初期,已有研究将红外观测的云顶亮温与微波观测的降水强度进行校准匹配,实现降水反演精度的提升。这些早期研究虽然取得了一定成效,但方法的限定性较强,难以推广到不同的气象条件中^[27]。近年来,随着遥感技术的进步和数据融合算法的发展,特别是基于机器学习的多源数据融合方法的应用,微波-红外高光谱联合观测在降水预测中的应用表现出了更高的准确性和适用性。通过充分利用微波和红外数据的互补性,新方法不仅显著提高了降水强度和分布的预测精度,还提升了时间和空间分辨率^[28,29]。这种联合应用的优势也体现在更加细分化的领域——大气水汽监测中。目前较为常用的方法是根据全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号穿过对流层时由大气水汽引起

的湿延迟,利用反演技术获取大气可降水量。虽然GNSS能够在各种气象条件下稳定工作,但是单一的GNSS层析成像模型在精度上仍有局限。近年来,结合红外和微波遥感数据与GNSS技术的多源融合方法,为构建更精确的三维水汽密度场提供了新的解决方案。Li等的研究表明,融合近红外中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、FY-4 A长波红外以及微波MIMIC(Morphed Integrated Microwave Imagery at CIMSS)数据,可以显著优化水汽分布模型的精度。这种多源遥感数据的比较不仅有助于选择最优数据源,还进一步验证了融合模型在近地面水汽密度分布中的优势,精度提升幅度可达5%~20%。通过这种方法,多源融合技术展现出提升水汽监测和层析成像精度的巨大潜力^[30]。

在极端天气事件的监测中,微波和红外高光谱遥感的联合应用同样具有重要意义。现有的热带气旋强度估算方法通常依赖单一卫星或单波段图像,难以有效量化估算结果的不确定性。然而,热带气旋作为一种高度混乱的天气系统,其强度估算在应急决策中需要提供置信区间。Song等^[31]利用多源遥感数据融合技术,通过双分支神经网络分别提取红外和微波遥感图像中的气旋特征,在特征融合后进行强度概率估计。这种融合模型在确定性强度估算上的表现与主流方法相当,但在不确定性量化和区间预测能力上表现更佳,为应急决策提供了更可靠的依据。与此同时,局地强对流云团的快速发展和复杂的垂直结构使得对其的观测面临挑战。红外高光谱遥感以其高空间分辨率和对云顶特征的敏感性,为强对流云团的检测提供了关键支持。目前常用的方法是利用红外高光谱数据反演云顶亮温,并通过亮温阈值法判定强对流的发生^[32]。然而,强对流云团在垂直方向上具有复杂的物理结构^[33],仅依赖云顶信息往往导致较高的误报率^[34]。微波遥感通过其对云层内部液态水和冰晶分布的敏感性,能够提供更全面的三维云体信息,从而有效提升强对流检测的准确性。此外,由于强对流云团的快速演变特性,高时间分辨率的观测至关重要。当前,由于缺乏实际可用的高时间分辨率静止轨道微波观测数据,静止轨道红外高光谱遥感成为重要的补充,其高时间分辨率和广覆盖能力能够实时捕捉云顶特征的变化,为强对流的早期预警提供了有力支持。

通过将微波遥感的垂直信息与红外高光谱遥感的高时间分辨率观测相结合,可以更全面地分析强对流云团的结构和演变,为极端天气事件的监测和预报提供科学依据^[35].

基于微波和红外遥感数据联合应用对大气过程观测的优势,这一方法在数值天气预报中具有显著的优化潜力. Liu 等^[36]通过对来自先进微波探测器 (Advanced Microwaved Sounding Unit, AMSU) 和大气红外探测器 (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 的遥感数据进行三维变分 (3D-var) 数据同化,探索了不同同化方式对大气各层预报精度的影响. 研究发现,不同数据同化方式在对大气不同层次的预报效果上存在差异,尤其是在对流层的不同层次中:微波数据对中上层对流层的预报有显著提升,而红外数据则对下层对流层的预报效果更为明显;尤其是在将红外数据与非匹配的微波数据结合使用时,能够显著提高大气预报的整体精度,特别是在对流层的表现上,显示了微波与红外数据协同作用的重要性. 研究进一步指出,合理结合微波和红外遥感数据能够有效优化预报模型的性能,提升天气预报系统的精度. 这一发现为未来的天气预报系统提供了新的思路和方法. 通过有效融合两种遥感数据,预报模型能够同时充分利用微波数据在中上层对流层的优势和红外数据在下层对流层的优势,从而获得更加全面和准确的大气状态信息. 此外,研究还提出了进一步优化同化窗口周期和检索系统性能的方向,认为这些因素可能对初始条件和边界条件的影响起着重要作用. 在数据同化过程中,如何合理选择同化时间窗口以及如何提升数据检索系统的准确性,将直接影响大气预报的初始条件,从而进一步提升天气预报的精度. 该研究为微波与红外遥感数据的联合应用提供了新的视角,证明了通过合理组合两种遥感数据可以有效提升数值天气预报的精度,尤其是在不同对流层之间的协同作用上.

2.2 在对陆地表面监测中的应用

陆地表面监测是地球系统研究中的重要环节,对理解全球变化及区域生态系统动态具有关键意义. 陆地表面温度 (Land Surface Temperature, LST) 和土壤湿度作为地表与大气交互的关键变量,不仅直接影响地表能量平衡和热力过程,还对气候变化有重要的指示作用,其变化反映了区域和全球气候变化的趋势,是气候模型验证的重要输入参数. 同时,陆地健康

状况也是监测重点,涵盖盐碱地、冻土分布及其动态变化等关键内容. 盐碱地的扩展可能导致土壤退化,影响农业生产和生态平衡;冻土的融化则与区域水文循环、碳释放及基础设施安全密切相关. 对陆地健康的监测在应对生态环境风险、保障资源可持续利用中扮演着不可或缺的角色.

由于微波遥感和红外高光谱遥感各自的特性,其结合使用在陆地观测中受到越来越多的关注. 微波遥感是全天候观测的核心技术之一,而红外高光谱遥感在获取地表精细结构和物质属性方面具有独特优势,这种互补特性使二者的联合应用成为可能,为陆地表面监测提供了更加全面和高效的解决方案.

微波遥感凭借其出色的穿透能力,可以实现对土壤表层以下几厘米深度的多层次湿度测量,从而提供更为精准的土壤湿度数据使得其在土壤湿度监测中得到了广泛应用. 早在 1995 年, Chanzy 等^[37]研究了微波遥感与红外遥感结合对其 1993 年提出的土壤蒸发率模型的优化. 他们发现,微波和红外遥感数据的融合能够显著提高模型的容错能力,即允许更大的输入误差,同时也增强了模型对土壤物理属性 (如表面粗糙度和土壤类型) 的敏感性. 这种结合进一步提升了土壤湿度反演结果的精度,为土壤水分动力学的研究提供了重要依据. 红外遥感数据在土壤湿度监测中还被用于对被动微波遥感数据进行降尺度处理,以实现更高分辨率的湿度信息获取. Zhong 等^[38]提出了一种基于光学遥感数据的新降尺度方法 (DespiTe). 该方法使用 500 m 分辨率的 MODIS 数据,将分辨率为 36 km 的 SMAP 被动土壤湿度产品降尺度,从而大幅提升了土壤湿度产品的空间分辨率. 此外,与传统降尺度方法相比,DespiTe 不仅在空间一致性方面表现优异,还显著提高了时间覆盖率. 通过更高质量的数据支持,该方法为精准农业、气候研究以及水文模型的改进提供了更多可能.

在陆地表面温度监测中,星载热红外遥感已提供了大量成熟的地表温度产品. 美国航空航天局 (NASA) 的 MODIS 地表温度数据以其较高的精度和全球覆盖能力广泛应用于气候和环境研究^[39]. 然而,由于热红外遥感对云层和大气条件敏感,在有云覆盖或降水情况下,地表温度的获取可能存在数据缺失或误差. 而陆地表面温度作为陆地-大气界面的关键变量,与地表能量交换、蒸发和降水等过程密切相关.

在气候变化和极端天气频发的背景下,能够对陆地表面温度进行近实时监测尤为重要。在降雨情况下,地表温度直接影响土壤水分蒸发率和区域降水过程的动态变化。微波遥感与热红外遥感的结合为陆地表面温湿度监测提供了一种有效解决方案。微波遥感的全天候能力弥补了热红外的缺陷,而红外遥感的高分辨率则提升了空间解析度。Zhang 等^[40]提出了一种基于时间分量分解的地表温度合成方法,通过结合热红外和被动微波数据,生成了 1 km 分辨率的全天候地表温度产品。该方法在时间和空间上有效地克服了单一遥感数据的限制,不仅提高了地表温度的获取精度,还保证了数据的连续性和可用性,在后期研究中也生成了近实时的地表温度监测数据集。这种全天时、全天候的产品适用于复杂天气条件下的监测需求,为陆地温度的实时动态监测提供了可靠支持^[40,41]。

在陆地健康监测方面,微波遥感和红外高光谱遥感的联合应用也展现了巨大的潜力。目前,已有多种基于遥感数据的干旱指数,例如垂直植被指数 (Perpendicular Vegetation Index, PVI) 和异常植被指数 (Anomaly Vegetation Index, AVI) 等,是用来检测地表干旱情况的重要因子。然而,这些指数多依赖单一数据源,并且对数据质量要求较高。为了解决此问题,Wang 等基于已有光学-红外波段结合模型,加入微波数据进行改进:微波遥感通过测量土壤水分含量提供了直观的湿度变化信息,而红外高光谱遥感则通过分析地表反射特性获取植被健康状况和土壤退化程度的精细信息提升干旱监测能力,为实现全天候、多尺度的干旱监测提供了新的可能性^[42]。这种多源数据的融合,不仅能更精确地识别干旱区域,还可以动态追踪干旱的发展过程,为水资源管理和农业规划提供科学依据。在此基础上,对于土地盐碱化问题,盐碱土通常表现出独特的光谱特征,红外高光谱遥感能够捕捉这些特征用于分类和识别。然而,由于盐碱土成分复杂且分类标准不统一,单一利用红外高光谱的方式难以获得公认的高精度结果。结合微波遥感数据,通过反演土壤水分和盐分含量,能够为红外光谱信息提供有效支撑,提高盐碱地监测的可靠性和精度。这一多源融合技术有助于精确评估盐碱化程度及其空间分布,为土地资源管理和治理提供科学依据^[43]。近地表冻融状态 (F/T) 的监测是理解土壤-大气相互作用的重要环节,对水、能量和碳循环研究具有重要意义。

然而,目前的大多数研究主要集中于低分辨率或局部区域的冻融状态观测,高分辨率的大范围冻融数据仍然缺乏。为了解决这一问题,Zhao 等^[44]提出了一种融合被动微波遥感和热红外遥感数据的新方法,通过整合微波遥感的介电特性敏感性和热红外遥感的地表温度信息,生成高分辨率的近地表冻融状态图。该研究在中国地区进行了验证,结果显示空间一致性超过 90%,时间一致性在升轨和降轨数据中分别达到 95.37% 和 86.62%,显著提升了冻融状态监测的精度和空间分辨率,弥补了传统被动微波遥感分辨率不足的缺陷,为大尺度冻融状态的研究提供了可靠的技术支持。这一成果为未来冻融监测的精细化发展奠定了基础,并为相关生态系统和气候变化研究提供了重要数据支持。

近年来,针对地质灾害观测的遥感技术取得了显著进展,其中地应力遥感作为一项新兴技术被提出,并逐渐应用于地质灾害预测和监测。红外遥感和微波遥感的结合为地应力遥感提供了重要支撑,可应用于地质灾害的监测和预测。Wu 等^[45]认为该方法通过整合地表岩石受力过程的红外成像观测、红外波谱辐射观测以及微波辐射观测,结合分析岩石受力过程中介电常数和表面发射率的变化,能够有效捕捉岩石的移动和破裂特征。这一技术为微观尺度上的地震、泥石流等灾害的预警提供了可靠手段,在地质灾害防治和减灾领域展现出巨大的应用潜力。

3 当前挑战与未来发展方向

微波遥感与红外高光谱遥感的结合在提升地球观测精度和时空覆盖能力方面具有重要意义,但当前仍面临多重技术挑战与应用瓶颈。在技术层面,两种遥感技术的数据在时空分辨率上的差异是融合的主要障碍之一。微波遥感的数十公里级和红外高光谱遥感的数十/百米级分辨率差异使得两种数据的匹配与融合变得复杂。此外,微波数据的时间覆盖性比易受大气和光照条件限制的红外高光谱数据高^[46]。如何在空间和时间维度上对两种数据进行统一的网格化和插值处理,以保证融合结果的物理一致性,是一个亟需解决的技术难题。

多传感器校准和数据一致性也是微波与红外数据融合中的核心挑战。微波和红外遥感仪器通常处于

不同的轨道高度和观测角度, 它们的观测范围和几何视差存在显著差异, 因此多传感器数据在融合前需要复杂的几何校正^[47]. 此外, 不同传感器的带宽和光谱特性也会影响反演结果的一致性^[48]. 在这一过程中, 仪器间的辐射校准和视差订正需要精确的参数支持, 稍有偏差就可能导致融合结果的误差累积^[49]. 目前, 已有研究尝试通过优化几何校正算法、提高辐射校准精度来解决这一问题, 但在复杂地形和极端环境下, 这一过程仍然存在较大挑战. 此外, 多源数据处理和融合模型的复杂性也是一个挑战. 基于物理模型的辐射传输模拟往往需要大量的计算资源, 而基于机器学习的融合算法则可能缺乏物理约束, 影响结果的可解释性和可靠性^[50]. 因此, 如何在保证计算效率的同时, 提高数据融合结果的物理一致性和解释能力, 将是未来研究的关键.

混合像元问题进一步加剧了遥感数据融合的难度. 在微波遥感中, 由于其低分辨率, 一个像元可能包含多种地表特征, 而红外高光谱遥感虽然具有更高的分辨率, 但仍可能在复杂地形和过渡区域存在混合像元现象. 这种像元内的光谱混合使得数据融合的解算过程更加复杂, 也对结果的精度提出了更高要求^[51]. 为解决这一问题, 近年来研究者提出了基于物理模型的混合像元分解方法, 结合机器学习算法, 有望逐步减少光谱混合的影响. 然而, 这些方法在实际应用中的效果仍待验证, 尤其是在大尺度地表监测中. 未来, 随着微波遥感仪器在带宽和分辨率上的提升, 这些技术挑战有望逐步得到缓解, 为融合模型的验证和优化提供更为可靠的实验基础.

近年来, 高光谱微波遥感概念的提出和应用带来了技术更新, 显著提升了微波遥感的探测能力^[52]. 传统微波遥感因通道数量有限, 分辨率较低, 难以满足逐年提升的精细化观测的需求. 与红外高光谱遥感中的高光谱技术相似, 高光谱微波遥感通过对频段进行精细划分, 增加了通道数量, 使得其探测频谱分辨率和垂直分辨率大幅提升. 这些改进使得微波遥感能够在更广的频谱范围内获取更详细的观测数据, 更加敏感地反映大气中温度和湿度的微小变化^[53]. 高光谱微波遥感与红外高光谱遥感的结合进一步扩展了多源遥感技术的潜力: 高光谱微波遥感更加精确了大气垂直廓线的测量, 与红外高光谱遥感原有优势结合, 通过匹配其在时间、空间和频谱维度上的更加细致的观

测数据, 可以更准确地描述大气与地表之间的能量交换和物质循环; 在数据融合的一致性方面, 高光谱微波遥感的频率点密度和垂直分辨率的提升, 使其能够更加精确地对应红外高光谱遥感的光谱信息, 从而减少数据融合中的不确定性. 这种更加精细的传感器数据对应关系, 不仅可以提升反演精度, 还为动态监测提供了更加全面的数据支持. 随着高光谱微波遥感技术的进一步发展, 与红外高光谱遥感的融合将更加紧密, 为多维度、多尺度的地球系统观测开辟新的研究和应用方向.

而在当前的应用层面, 尽管微波与红外高光谱遥感数据的融合研究已有多年历史, 但许多研究仍局限于小时空范围内的数据测试, 无法全面反映其在大尺度应用中的表现. 目前, 大部分融合研究的验证仍基于统计学分析或机器学习模型的效果评价, 缺乏物理过程的深入解析和实际应用的支撑. 特别是在极端气候事件或大规模生态环境监测等场景中, 现有的融合方法往往无法满足高精度、高时效性的需求. 同时, 现有研究较少关注开发可以直接使用的产品级融合数据, 应用成果多停留在理论和实验阶段. 未来, 随着理论研究的深入和融合算法的不断优化, 应逐步将多源遥感数据的融合技术应用于实际场景中, 例如全球大气温湿度动态监测、生态环境评估和极端天气预测等领域. 开发具有高精度、高时空分辨率的融合数据产品, 并与现有遥感应用体系相结合, 将是未来多源融合研究的重要发展方向. 这将不仅提升遥感数据的实际应用价值, 还将推动地球科学研究从理论支持向应用落地的转变.

4 结语

微波遥感与红外高光谱遥感的联合应用在地球系统观测中展现出重要潜力. 两种技术的结合弥补了单一遥感手段的不足, 提升了对于大气过程、极端天气和地表状况监测的精度. 研究表明, 融合技术能够提供更高分辨率、更连续的观测数据, 为气象预报、灾害管理、生态环境保护 and 资源利用规划提供科学支持. 然而, 当前研究仍面临时空分辨率差异、多传感器校准与一致性以及数据处理复杂性等技术挑战, 同时缺乏可直接应用的产品级数据. 未来的研究需要集中力量进一步优化数据融合算法与技术, 解决时空分

分辨率、数据一致性等关键技术问题, 推动遥感数据的高效融合与应用. 同时, 推动基于遥感数据的实际产品开发, 特别是在气候变化监测、生态环境保护与灾害响应等领域的应用, 将是未来发展的重点. 这不仅有助于提升遥感数据的实际应用价值, 也能为全球气候变化等重大问题的研究与应对提供更为可靠的科学依据.

参考文献

- [1] WULDER M A, LOVELAND T R, ROY D P, *et al.* Current status of Landsat program, science, and applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **225**: 127-147
- [2] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **202**: 18-27
- [3] LI Shutao, LI Congyu, KANG Xudong. Development status and future prospects of multi-source remote sensing image fusion[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, **25**(1): 148-166 (李树涛, 李聪好, 康旭东. 多源遥感图像融合发展现状与未来展望 [J]. *遥感学报*, 2021, **25**(1): 148-166)
- [4] SHEN H F, MENG X C, ZHANG L P. An integrated framework for the spatio-temporal-spectral fusion of remote sensing images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, **54**(12): 7135-7148
- [5] FAUVEL M, TARABALKA Y, BENEDIKTSSON J A, *et al.* Advances in spectral-spatial classification of hyperspectral images[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, **101**(3): 652-675
- [6] SISHODIA R P, RAY R L, SINGH S K. Applications of remote sensing in precision agriculture: a review[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(19): 3136
- [7] KE T, ZHONG Y F, SONG M, *et al.* Mineral detection based on hyperspectral remote sensing imagery on Mars: From detection methods to fine mapping[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, **218**: 761-780
- [8] TSANG L, KONG J A, SHIN R T. Theory of Microwave Remote Sensing[M]. New York: Wiley-Interscience, 1985
- [9] PAMPALONI P, PALOSCIA S. Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere[M]. London: CRC Press, 2000
- [10] GUIRAUD F O, HOWARD J, HOGG D C. A dual-channel microwave radiometer for measurement of precipitable water vapor and liquid[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 1979, **17**(4): 129-136
- [11] LIN M S, JIA Y J. Past, present and future marine microwave satellite missions in China[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(6): 1330
- [12] PU R L. Hyperspectral Remote Sensing: Fundamentals and Practices[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017
- [13] SABINS F F JR, ELLIS J M. Remote Sensing: Principles, Interpretation, and Applications[M]. 4th ed. Long Grove: Waveland Press, 2020
- [14] HE Jieying, ZHANG Shengwei, WANG Zhenzhan, *et al.* Prospects for microwave atmospheric sounding of the new generation of Fengyun meteorological satellites[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1025-1035 (何杰颖, 张升伟, 王振占, 等. 风云气象卫星微波大气探测回顾与展望 [J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(6): 1025-1035)
- [15] WANG Z, WENG F Z, HAN Y, *et al.* Evaluations of microwave sounding instruments onboard FY-3F satellites for tropical cyclone monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(23): 4546
- [16] XIAO H Y, HAN W, ZHANG P, *et al.* Assimilation of data from the MWHS-II onboard the first early morning satellite FY-3E into the CMA global 4D-Var system[J]. *Meteorological Applications*, 2023, **30**(3): e2133
- [17] LIU Yinnian, SUN Dexin, HU Xiaoning, *et al.* Development of visible and short-wave infrared hyperspectral imager onboard GF-5 satellite[J]. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 2020, **24**(4): 333-344 (刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 等. 高分五号可见短波红外高光谱相机设计与研制 [J]. *遥感学报*, 2020, **24**(4): 333-344)
- [18] WENG F, ZOU X, WANG X, *et al.* Introduction to Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder for numerical weather prediction and tropical cyclone applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D19): D19112
- [19] WAGNER W, BLÖSCHL G, PAMPALONI P, *et al.* Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications[J]. *Hydrology Research*, 2007, **38**(1): 1-20
- [20] SRIVASTAVA P K, O'NEILL P, COSH M, *et al.* Evaluation of dielectric mixing models for passive microwave soil moisture retrieval using data from ComRAD ground-based SMAP simulator[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, **8**(9): 4345-4354
- [21] YANOVSKY I, BEHRANGI A, WEN Y X, *et al.* Enhanced resolution of microwave sounder imagery through fusion with infrared sensor data[J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(11): 1097
- [22] XIE Zhenchao, XU Hongxin, AN Dawei, *et al.* Remote sensing technology of experimental microwave radiometer in geostationary orbit[J]. *Aerospace Shanghai*, 2018, **35**(2): 49-59 (谢振超, 徐红新, 安大伟, 等. 微波辐射计静止轨道遥感试验技术 [J]. *上海航天*, 2018, **35**(2): 49-59)
- [23] YANG Hequn, WANG Xiaofeng, GAO Yanqing, *et al.* Analysis of satellite big data requirements in numerical

- weather prediction[J]. *Big Data Research*, 2022, **8**(2): 89-102 (杨何群, 王晓峰, 高彦青, 等. 数值天气预报对卫星大数据的需求分析 [J]. *大数据*, 2022, **8**(2): 89-102)
- [24] MADDY E S, BOUKABARA S A. MIIDAPS-AI: An explainable machine-learning algorithm for infrared and microwave remote sensing and data assimilation preprocessing - Application to LEO and GEO sensors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, **14**: 8566-8576
- [25] KAZUMORI M. Assimilation experiments of microwave and infrared radiance data in JMA global numerical weather prediction system[C]//IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan: IEEE, 2019: 4738-4740
- [26] WANG W W, SHI C, SHANG H Z, *et al.* Development of an algorithm for the simultaneous retrieval of cloud-top height and cloud optical thickness combining radiative transfer and multisource satellite information from O₄ hyperspectral measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, **62**: 4104111
- [27] KIDD C, KNIVETON D R, TODD M C, *et al.* Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, **4**(6): 1088-1104
- [28] WANG C G, TANG G Q, GENTINE P. PrecipGAN: Merging microwave and infrared data for satellite precipitation estimation using generative adversarial network[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(5): e2020GL092032
- [29] UPADHYAYA S A, KIRSTETTER P E, GOURLEY J J, *et al.* On the propagation of satellite precipitation estimation errors: from passive microwave to infrared estimates[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, **21**(6): 1367-1381
- [30] LI S, JIANG N, XU T H, *et al.* Tightly coupled tomography model for atmospheric water vapor based on multisource remote-sensing and GNSS data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, **62**: 5800816
- [31] SONG T, YANG K L, LI X, *et al.* Probabilistic estimation of tropical cyclone intensity based on multi-source satellite remote sensing images[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(4): 606
- [32] QIN Danyu, FANG Zongyi. Research progress of geostationary satellite-based convective initiation[J]. *Meteorological Monthly*, 2014, **40**(1): 7-17 (覃丹宇, 方宗义. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展 [J]. *气象*, 2014, **40**(1): 7-17)
- [33] CUI Xinyan, CHEN Mingxuan, QIN Rui, *et al.* Research advances in the convective initiation mechanisms[J]. *Meteorological Monthly*, 2021, **47**(11): 1297-1318 (崔新艳, 陈明轩, 秦睿, 等. 对流初生机理的研究进展 [J]. *气象*, 2021, **47**(11): 1297-1318)
- [34] MA Penghui, YANG Yanjun, ZHANG Jian. Research summary of convective initiation prediction based on meteorological satellite images[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2014, **37**(1): 1-5 (马鹏辉, 杨燕军, 张剑. 基于卫星云图的对流初生预测技术综述 [J]. *气象与减灾研究*, 2014, **37**(1): 1-5)
- [35] WEI Xiaocheng. Joint Application of Infrared Imaging and Microwave Detection in Early Warning of Local Convection[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2021 (韦晓澄. 红外成像和微波探测在局地对流发生预警中的联合应用研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2021)
- [36] LIU C Y, KUO S C, LIM A H N, *et al.* Optimal use of space-borne advanced infrared and microwave soundings for regional numerical weather prediction[J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(10): 816
- [37] CHANZY A, BRUCKLER L, PERRIER A. Soil evaporation monitoring: a possible synergism of microwave and infrared remote sensing[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, **165**(1/2/3/4): 235-259
- [38] ZHONG Y M, WEI Z S, MIAO L G, *et al.* Downscaling passive microwave soil moisture estimates using standalone optical remote sensing data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, **62**: 4504919
- [39] LI Z L, TANG B H, WU H, *et al.* Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **131**: 14-37
- [40] ZHANG X D, ZHOU J, GOTTSCHKE F M, *et al.* A method based on temporal component decomposition for estimating 1-km all-weather land surface temperature by merging satellite thermal infrared and passive microwave observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(7): 4670-4691
- [41] TANG W B, XUE D J, LONG Z Y, *et al.* Near-real-time estimation of 1-km all-weather land surface temperature by integrating satellite passive microwave and thermal infrared observations[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 7001305
- [42] WANG Z D, GUO P, WAN H. Improved drought monitoring method based on multisource remote sensing data[C]//IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2020: 5282-5285
- [43] FU Haoyang. Salinization Monitoring and Soil Moisture and Salinity Retrieval based on Optical and Microwave Remote Sensing Technology[D]. Changchun: Jilin University, 2020 (付浩阳. 基于光学及微波遥感技术的土地盐碱化监测及土壤水分盐分反演研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020)
- [44] ZHAO T J, SHI J C, HU T X, *et al.* High resolution freeze/thaw states detection using combination of passive microwave and thermal infrared observations[C]//IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote

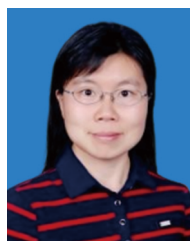
- Sensing Symposium. Valencia, Spain: IEEE, 2018: 8555-8558
- [45] WU Lixin, MAO Wenfei, LIU Shanjun, *et al.* Mechanisms of altering infrared-microwave radiation from stressed rock and key issues on crust stress remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(S1): 146-161 (吴立新, 毛文飞, 刘善军, 等. 岩石受力红外与微波辐射变化机理及地应力遥感关键问题 [J]. *遥感学报*, 2018, **22**(S1): 146-161)
- [46] GAO Y H, ZHANG M M, WANG J J, *et al.* Cross-scale mixing attention for multisource remote sensing data fusion and classification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, **61**: 5507815
- [47] SHU T. Multi-sensor remote sensing image alignment based on fast algorithms[J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2023, **32**(1): 20220289
- [48] ZHANG J X. Multi-source remote sensing data fusion: Status and trends[J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2010, **1**(1): 5-24
- [49] KHALEGHI B, KHAMIS A, KARRAY F O, *et al.* Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art[J]. *Information Fusion*, 2013, **14**(1): 28-44
- [50] LI J X, HONG D F, GAO L R, *et al.* Deep learning in multimodal remote sensing data fusion: A comprehensive review[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, **112**: 102926
- [51] SU Yuanchao, XU Ruqing, GAO Lianru, *et al.* Development of deep learning-based hyperspectral remote sensing image unmixing[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, **28**(1): 1-19 (苏远超, 许若晴, 高连如, 等. 基于深度学习的高光谱遥感图像混合像元分解研究综述 [J]. *遥感学报*, 2024, **28**(1): 1-19)
- [52] BLACKWELL W J, BICKMEIER L J, LESLIE R V, *et al.* Hyperspectral microwave atmospheric sounding[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(1): 128-142
- [53] HE Jieying, ZHANG Shengwei, ZHANG Yu. Microwave-Based High-Resolution Atmospheric Temperature and Humidity Detection[J]. *IEEE Spectrum*, 2024(4): 76-77 (何杰颖, 张升伟, 张瑜. 微波大气温湿度精细探测 [J]. *科技纵览*, 2024(4): 76-77)

作者简介



李旌阳 女, 现为中国科学院国家空间科学中心助理工程师, 主要从事红外与微波遥感融合技术及精细谱微波遥感分析研究.

E-mail: lijingyang@mirslab.cn



何杰颖 (通信作者) 女, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 风云三号卫星微波湿度计与海洋卫星盐度辐射计副主任设计师、空间科学 (二期) 预先研究项目负责人, 主要从事星载微波辐射计设计与研制、定标技术及地球与行星探测定量反演研究.

E-mail: hejieying@mirslab.cn