

遥感科学与技术领域十大前沿问题

张兵¹, 陈晋², 陈正超¹, 陈佐旗³, 程晓⁴, 范闻捷⁵, 李素菊⁶,
刘良云⁷, 刘瑜⁵, 柳钦火¹, 柳思聪⁹, 穆西晗², 漆建波²,
任华忠⁵, 石茜⁸, 孙显¹, 田庆久¹⁰, 万华伟¹¹, 吴小丹¹²,
吴一戎¹, 吴昀昭¹³, 闫琚¹, 闫凯², 阎广建², 余柏菡¹⁴,
俞乐¹⁵, 赵玉金¹⁶, 曾源¹, 郑朝菊¹, 郑雷⁴

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
2. 北京师范大学, 北京 100875;
3. 福州大学, 福州 350108;
4. 中山大学, 珠海 510275;
5. 北京大学, 北京 100091;
6. 应急管理部国家减灾中心(卫星减灾应用中心), 北京 100124;
7. 北京师范大学, 珠海 519080;
8. 中山大学, 广州 510006;
9. 同济大学, 上海 200092;
10. 南京大学, 南京 210000;
11. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;
12. 西南交通大学, 成都 610031;
13. 中国科学院紫金山天文台, 南京 222122;
14. 云南师范大学, 昆明 650500;
15. 清华大学, 北京 100084;
16. 中国科学院植物研究所, 北京 100093

摘 要: 遥感技术是人类认知地球系统的基础。星—空—一塔—地多平台协同观测与人工智能、大数据、数字孪生等技术融合, 正推动遥感观测从静态、单圈层、形态描述型转向动态、跨圈层、过程反演与三维透视相结合的综合观测, 加速地球科学向数据驱动的定量分析范式转型。本文凝练了学科转型过程中十大前沿科学问题, 可归纳为3类: (1) 理论与建模类, 包括多维辐射传输机理、遥感大模型与智能体、极地冰盖透视探测, 聚焦物理机理与人工智能融合的统一建模; (2) 观测技术类, 涵盖虚拟星座协同观测、多模态实时处理、自然灾害监测预警, 重在多平台协同与智能处理能力提升; (3) 系统应用类, 涉及碳水能量循环、宜居星球探测、人地系统融合、气候变化影响, 旨在支撑重大科学与社会需求。3类问题共同指向遥感与AI深度融合、多源数据协同及“观测→决策”范式升级; 差异在于: 理论类重基础突破, 技术类重系统实现, 应用类重交叉落地。总体趋势是从经验驱动转向“物理机制+数据驱动”, 从静态监测迈向动态预测与智能决策; 未来需加强跨学科合作、开放平台建设与国际协同, 以应对气候变化、自然灾害、生态退化及深空探测等重大挑战。

关键词: 辐射传输, 碳水能量循环, 协同观测, 遥感大模型, AI智能处理, 宜居星球, 人地系统耦合, 极地冰盖, 自然灾害, 生态系统

中图分类号: P2

引用格式: 张兵, 陈晋, 陈正超, 陈佐旗, 程晓, 范闻捷, 李素菊, 刘良云, 刘瑜, 柳钦火, 柳思聪, 穆西晗, 漆建波, 任华忠, 石茜, 孙显, 田庆久, 万华伟, 吴小丹, 吴一戎, 吴昀昭, 闫琚, 闫凯, 阎广建, 余柏菡, 俞乐, 赵玉金, 曾源, 郑朝菊, 郑雷. 2026. 遥感

科学与技术领域十大前沿问题. 遥感学报

Zhang B, Chen J, Chen Z C, Chen Z Q, Cheng X, Fan W J, Li S J, Liu L Y, Liu Y, Liu Q H, Liu S C, Mu X H, Qi J B, Ren H Z, Shi Q, Sun X, Tian Q J, Wan H W, Wu X D, Wu Y R, Wu Y Z, Yan J, Yan K, Yan G J, Yu B L, Yu L, Zhao Y J, Zeng Y, Zheng Z J and Zheng L. 2026. Top ten frontier scientific issues in the field of remote sensing science and technology. *National Remote Sensing Bulletin*

遥感技术提供了人类研究地球的新途径和新视野,使地球科学研究从局部拓展到全球乃至外太空。遥感技术的革新也正在加速扩展人类对地球系统的认识边界,推动了数据科学发展并催生出地球科学研究新范式——数据范式。

近年来,随着星—空—地多平台观测技术的进步和整合,以及人工智能、大数据和数字孪生技术的兴起,遥感在观测能力、信息提取精度和智能化水平等方面的进展日新月异。另一方面,地球观测需求也正发生巨大转变:从传统的静态、分圈层、结构性的探测,升级为动态、跨圈层、过程性的且有透视能力的综合观测。因此,遥感技术在观测维度、尺度、精度和协同性上必须全面升级,并不断向深地、深海、极地及其他极端环境延伸,获取时空信息的精度、速度、广度方面面临巨大挑战。此外,面对日益加剧的全球气候变化、频发的自然灾害、生态系统退化以及日益增长的深空探测需求,遥感都面临一系列亟待突破的前沿科学挑战。

本文提出的遥感领域十大前沿科学问题涵盖:多维辐射传输机理、地球多圈层耦合智能遥感、虚拟卫星星座、遥感基础大模型、多模态实时智能处理技术、行星宜居性环境探测、人地系统多模态感知、极地冰盖内部多尺度物理过程探测、自然灾害实时监测与预警、全球气候变化对区域生态系统的影响等。这些挑战不仅反映了遥感本身的理论瓶颈和技术难点,也凸显了遥感在应对可持续发展、气候变化、减灾防灾、公共卫生和深空探测等重大全球需求中的关键作用。通过对这些前沿问题的全面分析,本文旨在为遥感学者提供更全面、更综合的视角,推动遥感研究向“物理引导+数据驱动”的范式转变,并促进遥感从“面向观测”到“面向智能决策”的转型,以构建全球覆盖、实时、智能的地球观测系统。

1. 多维度遥感辐射传输机理与认知统一建模。多维度(尺度、谱段、角度、时相等)遥感观测和人工智能技术的快速发展,为地球系统科学研究提供了新的契机(Zeng等, 2022; Wu等,

2025)。而“多维度遥感辐射传输机理与认知统一建模”这一前沿科学问题,正是地球系统跨圈层、多尺度定量遥感正向模拟、定量反演与科学认知的理论基石(Zhang等, 2017; Cao等, 2019; Lanconelli等, 2025)。其核心内涵和关键难点在于复杂地表(如异质植被、粗糙地表、混合像元、山地地形)的跨尺度数学统一描述、多维度主被动遥感辐射与散射机理解析、多维度主被动定量遥感统一建模、地球耦合遥感成像仿真、物理约束的多维度定量遥感AI大模型构建以及超高维病态反演问题的稳健求解方法等(Qi等, 2019; Wang等, 2024; Fan等, 2024; Zhao等, 2025)。该前沿科学问题的深入研究,将促进定量遥感物理机理与人工智能的深度融合,催生新一代“物理引导的人工智能建模”范式,支撑新一代“物理可解释、泛化能力强”的遥感智能反演模型的构建,提升地球系统跨圈层多尺度数值模拟与科学认知水平(Zerah等, 2024; Salesin等, 2024; Fan等, 2025)。

2. 地球表层系统物质与能量循环过程的遥感信息智慧提取。碳水能量循环是地球表层系统最核心的物质与能量交换过程,深刻影响全球气候、生态与粮食安全,是实现全球碳减排目标的关键。遥感是目前唯一能实现对此过程进行全域化、长期化监测的技术手段(Xiao等, 2019)。然而,当前碳水能量循环遥感监测存在三大核心痛点:一是碳、水、能量通量耦合协同提取能力弱,单一参数反演无法有效支撑地学发现;二是智慧化水平不足,难以高效协同融合“星—空—地”多源数据(Pan等, 2025),导致产品时空一致性差、不确定性大;三是前后端应用脱节,预设分辨率的全球遥感专题产品无法满足多样化的用户需求,造成数据和计算资源存储和算力浪费。这些问题源于遥感“瞬时观测”与地球系统“连续过程”之间的根本性矛盾,因此,“面向碳水能量循环过程的遥感信息智慧提取”这一科学问题具有重大价值。在学科发展层面,它将推动遥感反演从“经验驱动”向“机制+数据双驱动”转型,引领

技术向智慧化、精准化升级 (Shen 等, 2023)。在行业应用层面, 它能为生态系统健康评估、水资源管理、气候预测和碳汇核算提供核心技术支撑, 助力全球气候治理与生态文明建设。

3. 遥感卫星虚拟星座协同观测理论与方法。对地观测正从单星独立运行向多星智能协同的新范式演进。然而, 全球在轨卫星呈现物理分散、体制异构、标准各异的格局; 天基、空基与地基等多源数据在辐射基准、几何精度、时空尺度与光谱响应上存在固有差异, 严重制约了数据融合与协同分析能力 (Liu 等, 2024)。传统“发射后验证”和“数据后处理”模式已无法满足高精度、高一致性、高时效性的全球动态监测需求。

遥感卫星虚拟星座协同观测理论与方法旨在突破上述瓶颈, 通过构建从地表—大气—载荷到数据处理的端到端数字孪生模型, 实现对不同平台、多类型载荷在复杂观测场景下辐射与几何响应行为的高保真模拟与量化评价, 从根本上提升虚拟星座观测效能的可预测性、多源数据的物理一致性及可协同性。同时, 建立地基真实性检验与多星联合定标体系, 以地基高精度定标与验证数据为数字孪生模型提供基准输入与验证依据, 驱动其迭代优化, 形成“仿真设计—真实观测—效能评估—模型优化”的闭环调控机制 (Xiao 等, 2025)。优化后的数字孪生系统不仅提升虚拟星座的整体观测效能, 又能反向指导地面观测网络的科学布局与协同策略, 实现天基地基双向赋能。

在此基础上, 通过构建统一离散全球格网与多尺度表示框架, 制定虚拟星座协同观测的技术标准与规范, 发展物理机理与数据驱动相融合的混合研究范式, 推动对地观测从传统数据获取向智能任务规划与精准信息提取的范式转变 (Hang 等, 2025)。该研究将为构建全球对地观测虚拟星座提供关键科学支撑, 助力遥感科学实现从分散观测向系统化协同感知的跨越发展。

4. 遥感大模型与智能体驱动地学关键参量定量反演。随着对地观测进入大数据时代, 人工智能与遥感的深度融合正推动地学研究从传统物理模型驱动向数据与知识协同驱动跨越 (Zhang 等, 2019; Irrgang 等, 2021)。在地学关键参量 (如植被生产力、地表温度、碳通量等) 的定量反演中, 传统方法长期面临多源数据融合难、时空跨度泛化弱及物理机制耦合不足等瓶颈。遥感大模型通

过在大规模多模态数据上的预训练, 构建了统一的时空表征体系, 实现了跨载荷、跨区域、跨时相的特征迁移, 显著提升了复杂地表环境下参数反演的精度与鲁棒性 (Wu 等, 2025)。在此基础上, 遥感智能体通过集成感知、推理与决策能力, 实现了从被动数据处理到主动任务求解的转变, 能够自主理解科学目标、根据地学物理约束自动编排反演 workflow、动态调用专业模型库与工具链, 并对反演结果作出符合专家认知的科学解释, 形成了“观测—反演—认知”的闭环 (Chen 等, 2026)。二者的协同作用不仅加速了地学参量提取的自动化, 更通过引入物理约束与专家知识解决了传统深度学习“黑盒”模型在定量计算中的不可解释性难题, 推动了反演范式从“纯数据拟合”向“物理—数据双驱动”的跃迁。未来需重点突破多源异构数据的一致性表征、高精度物理反馈机制、智能体自主决策逻辑等关键技术。构建开放的反演基准与训练评测平台, 将进一步促进大模型与智能体在地表过程模拟、气候变化监测及防灾减灾等复杂地学场景中的深度应用, 实现从“专家经验反演”到“智能体自主研判”的变革。

5. 多模态遥感实时智能处理技术。随着对地观测能力的持续提升, 遥感数据获取已进入多平台、多传感器、高时空分辨率时代, 并向高频更新与准实时获取演进 (Cai 等, 2025)。然而, 数据获取与场景应用之间仍存在显著脱节, 遥感数据的规模、多样性与复杂性往往制约其直接转化为可落地的业务认知, 尤其是在实时响应和跨模态协同处理方面能力不足 (康利鸿 等, 2024), 导致数据在农业、灾害、城市、生态等关键领域未能充分发挥价值。

近年来, 以 AlphaEarth Foundations (AEF) 为代表的遥感基础模型推动遥感数据向“AI 就绪数据”演进 (Brown 等, 2025), 通过统一嵌入表示降低了海量、多源遥感数据的使用门槛, 为实现大规模智能分析提供了基础设施 (Yu 等, 2025)。然而, 当前模型体系仍主要面向离线分析范式, 在实时处理能力、多模态动态协同、以及面向任务的快速推理方面仍存在明显不足, 难以支撑复杂业务场景下的即时决策需求。

因此, 有必要发展面向具体应用场景的多模态融合、实时响应的全链条遥感智能处理技术体系。该体系应融合多源数据协同建模、实时处理

机制与智能推理能力,结合遥感物理机理、领域知识与用户意图,实现从多模态数据实时感知、动态理解到智能决策的闭环处理,推动遥感智能从“离线分析”向“实时智能服务”演进,为构建高时效、高可信、可推广的遥感智能应用系统提供关键技术支撑。

6. 宜居星球与宜居环境遥感探测。宜居星球搜寻和宜居环境演化是当前国际行星科学与深空探测领域的关键科学目标,是《Science》杂志聚焦的当前125个重大科学问题之一,可为解答地球生命起源和宇宙演化等提供重要依据。2028年前后,美国“阿尔忒弥斯计划”将载人重返月球,欧空局的火星着陆器计划登陆火星。中国也将于2028年前后实施“天问三号”火星采样返回任务,生命痕迹探寻是其第一科学目标,重点要解决“去哪里”、“采什么”和“怎么采”的关键难题(Hou等, 2024)。协同多源遥感(可见光、红外、微波、激光、中子等)探测手段,对太阳系行星及其卫星的表面圈层开展广域尺度和原位尺度的高精度感知探测,可为厘清宜居星球的形貌构造、物质组分、大气环境、物理场及内部结构等关键指标要素提供重要的技术支撑(Zhao等, 2024; Liu等, 2025)。此外,新型遥感探测技术和人工智能大模型将进一步赋能宜居星球搜索和宜居区域选址,突破地球与地外星球宜居环境综合类比的研究新范式,为行星宜居性评估、宜居环境演化过程、生命起源和保存等科学问题提供新的认知。

7. 支持人地系统耦合过程认知的遥感与社会感知数据多模态融合。人地系统是自然环境与社会经济相互作用、相互影响的复杂巨系统,对人类可持续发展影响深远。系统认知人地耦合过程更依赖于跨圈层协同整合的地球系统科学框架,亟需融合面向自然特征监测的遥感对地观测与基于夜光遥感、社会感知等遥感与非遥感多模态数据的对人观测(Xing等, 2024)。社会感知数据(如社交媒体、手机信令、车辆轨迹等)直接刻画人类活动的时空格局与模式,与反映地表自然状态的遥感信息形成深层互补,共同支撑对“自然—社会”交互关系的立体解析。对社会经济活动的全面、精细感知,是构建高拟真“数字孪生”环境、支持时空模拟与优化决策的重要基础(Liu等, 2026)。当前,该方向在理论架构与关键技术

层面仍面临一系列挑战。首先,社会经济系统具有高动态、非平稳及重尾分布等复杂统计特征,其观测数据亦存在显著的不确定性,传统基于光谱物理规律的遥感融合理论难以直接适用,亟需发展跨模态统一融合的新理论框架。其次,多源数据在时空基准、颗粒度与语义层次上不一致,导致可靠的时空对齐、不确定性量化与语义关联建模困难;从异构数据中提取稳健地理特征并实现可解释融合,仍缺乏普适性方法(李树涛等, 2025)。此外,如何通过耦合建模厘清自然与社会经济系统间的非线性、双向影响机制,仍是核心难点。因此,如何创新遥感与非遥感多模态数据的融合理论,攻克时空—语义协同、不确定性传导建模与复杂机制解译等关键技术,从而系统揭示人地系统耦合过程,并支撑“数字孪生”构建与时空优化应用,已成为遥感科学的前沿科学问题。解决这些挑战,将实现大范围、长时序、精细化的人地系统动态研究,为可持续发展提供核心科学支撑。

8. 极地冰盖多尺度物理过程遥感透视探测。精确预测未来海平面上升的速率,是当前最紧迫的科学挑战之一。若两极冰盖完全融化,全球平均海平面将上升约70 m。极地冰盖系统可能正在逼近临界点(李雅等, 2024; Zhou等, 2025):大气增温正加速格陵兰冰盖物质流失,或将进入不可逆转的物质亏损阶段;而海洋增温正加速西南极冰架底部融化,可能诱发冰盖基底失稳而突然崩塌。此外,冰盖底部存在大量相互连通的冰下水文系统,其排水过程会导致冰盖的快速滑动。冰面融水引发的水力压裂作用会促使冰裂隙进一步扩展,甚至诱发冰盖快速崩解,从而导致内陆冰体加速向海洋输送(Zheng等, 2025)。

上述发生在冰盖内部和底部的过程非常复杂,构成了预测冰盖变化的最大知识缺口。其关键科学问题包括但不限于:冰盖内部水文系统如何分布?深层水与陆架水如何调控冰架底部融化?冰盖底部水文过程如何影响冰盖稳定性?等。传统遥感手段只能进行二维成像,无法描述内部分层特征。机载和地面冰雷达探测虽能提供冰盖高分辨率“切片”,但无法实现大尺度透视。

“遥感透视冰盖”的本质是利用电磁波或重力场等穿透介质,并接收来自内部结构或界面的信号。然而,它面临穿透深度与分辨率相互制约、

信号解译复杂、观测尺度有限等挑战。如何构建动态三维冰盖模型并预测其变化,是一个集尖端技术攻坚、重大科学需求、高度学科交叉于一体的前沿科学问题,是应对气候危机的“关键战场”,探索前景广阔、意义重大。

9. 全球自然灾害遥感即时监测与预警技术。自然灾害与气候变化、人类活动耦合使得全球灾害的复杂性、极端性加剧,灾害风险的不确定性增加,为人类社会可持续发展带来巨大挑战(Huning和Brunner, 2026)。迅猛发展的卫星遥感与人工智能技术正加速融合,为全球自然灾害的即时监测预警带来机遇。如何将爆发式增长的多模态遥感数据智能化应用于全球自然灾害的预测预警、风险防范与应急救援(Voigt等, 2016),实现以人为中心的安全赋能,是当前遥感即时应急减灾亟待解决的科学技术难题。基于遥感本体认知理论,将自然灾害综合风险要素和遥感响应特征进行层次化解析、图谱化表达和关联关系建模,深化对自然灾害发生发展过程和风险演变规律的遥感特性机理的理解,提升对综合灾害风险的科学认知;同时,结合“遥—通—导”一体化的实时、智能、主动服务,破解复杂极端场景高灵敏感知、地表异常变化遥感即时探测、遥感大数据智能解析与风险主动认知、精准预警防范与靶向应急救援等技术难题,建立“感知—认知—决策”自然灾害预测与态势生成的智能模型,形成全球全时全息遥感信息服务,提升精准自然灾害预警、精细综合风险防范与即时应急救援决策能力,助力落实全球安全倡议和减轻灾害风险。

10. 全球气候变化对区域生态系统影响的遥感预测。在全球气候变化与社会经济快速发展的背景下,生态系统正面临生物多样性丧失、生态系统功能退化与韧性下降等多重冲击。传统地面调查受限于时空尺度,制约了全球变化对区域生态系统影响的科学认知。遥感技术为生态系统监测提供了重要途径,但仍面临两大核心瓶颈:一是缺乏遥感驱动的生态系统功能与韧性核心监测指标,难以量化及预测生态系统对全球变化的响应;二是缺少多尺度协同的生物多样性与环境健康风险遥感产品,难以支撑精准化与业务化应用。

未来研究可集成地面—近地面—卫星观测及环境DNA等多源数据,深度融合人工智能与生态学理论,提出从个体、种群、群落至生态系统水

平的全方位生物多样性遥感监测技术框架,构建涵盖物种、功能、系统发育多样性与生态系统韧性的多维度指标体系(武慧等, 2025; 曾源等, 2025),发展动态预警模型,识别生态扰动与临界转折点,实现从“静态评估”向“动态预警”的转变,为评估和预测全球变化下生态系统响应提供科学依据(俞乐等, 2025; Zhao等, 2026)。同时,突破病原体—宿主—生境关键参数的精细反演技术,揭示生态变化与人群健康风险的关联机制,构建“环境—生态—健康”耦合的数字孪生系统,形成业务化运行的“感知—分析—预警—反馈”闭环,为全球变化背景下的生态系统管理与公共健康保障提供科学支撑。

本文总结了遥感科学与技术领域的十大前沿关键问题,分析了它们的核心内涵、关键挑战及未来发展方向。可以发现遥感领域正在经历一场范式转变——从经验范式向由物理机制引导+大数据驱动的双驱研究范式,以及从“面向观测”向“面向智能决策”的转型。这些重大转变同时也要求遥感在理论模型、技术方法和应用框架方面进行系统性突破。

在理论层面,需要建立将物理机制与人工智能相融合的统一、跨尺度、多维辐射传输模型,这对于提高遥感模型的精度和可解释性至关重要;在技术层面,发展协同观测的虚拟星座系统、推进多模态实时智能处理技术、以及研发基础大模型与智能体,以全面提升遥感系统探测能力和智能化水平;在应用层面,需要面对气候变化、自然灾害、生态系统以及人地系统等研究中的复杂需求,需要推动遥感技术从“静态监测”向“动态预测”转变,并构建从感知到决策的闭环智能服务链。

综上,遥感科学与技术正朝着智能感知、多模态协同观测和跨域融合的新时代迈进。未来的工作应优先考虑跨学科合作、开放数据共享、智能平台建设以及国际合作,从而使遥感最终成为支撑全球可持续发展及人类安全福祉的核心科技力量。

志 谢 感谢对“遥感科学与技术领域十大前沿问题”发挥重要作用的学者:边钊,中国科学院空天信息创新研究院;董磊,北京大学;杜贞容,大连理工大学;杜家昕,中国科学院空天

信息创新研究院；冯权浣，中国农业大学；计璐艳，中国科学院空天信息创新研究院；贾坤，北京师范大学；李新，中国科学院青藏高原研究所；李多多，中国科学院空天信息创新研究院；李薇，中国科学院空天信息创新研究院；聂胜，中国科学院空天信息创新研究院；潘小乐，中国科学院大气物理研究所；沈妙根，北京师范大学；石崇，中国科学院空天信息创新研究院；宋春桥，中国科学院南京地理与湖泊研究所；苏杭，中国科学院大气物理研究所；苏红军，河海大学；辛金元，中国科学院大气物理研究所；杨沛琦，南京师范大学；尤笛，中国科学院空天信息创新研究院；张肖，中国科学院空天信息创新研究院。

参考文献 (References)

- Brown C F, Kazmierski M R, Pasquarella V J, Rucklidge W J, Sam-sikova M, Zhang C H, Shelhamer E, Lahera E, Wiles O, Ilyushchenko S, Gorelick N, Zhang L L, Alj S, Schechter E, Askay S, Guinan O, Moore R, Boukouvalas A and Kohli P. 2025. Alpha-Earth foundations: an embedding field model for accurate and efficient global mapping from sparse label data. arXiv preprint arXiv: 2507.22291 [DOI: 10.48550/arXiv.2507.22291]
- Cai Y T, Li X, Zhu P, Nie S, Wang C, Liu X P and Chen Y H. 2025. China earth observation data cube: the 30-m seamless annual leaf-on Landsat composites from 1985 to 2023. *Journal of Remote Sensing*, 5: 0698 [DOI: 10.34133/remotesensing.0698]
- Cao B, Liu Q H, Du Y M, Roujean J L, Gastellu-Etchegorry J P, Trigo I F, Zhan W F, Yu Y Y, Cheng J, Jacob F, Lagouarde J P, Bian Z J, Li H, Hu T and Xiao Q. 2019. A review of earth surface thermal radiation directionality observing and modeling: historical development, current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111304 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111304]
- Chen Z C, Wang H R, Yao J, Ghamisi P, Zhou J, Atkinson P M and Zhang B. 2026. CangLing-KnowFlow: a unified knowledge-and-flow-fused agent for comprehensive remote sensing applications. arXiv preprint arXiv: 2512.15231 [DOI: 10.48550/arXiv.2512.15231]
- Fan T Y, Bian Z J, Roujean J L, Huang H G, Li H, Bai J H, Cao B, Du Y M, Xiao Q and Liu Q H. 2025. STREAM: a system for tracing radiative transfer and energy balance in heterogeneous surfaces. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 142: 104763 [DOI: 10.1016/j.jag.2025.104763]
- Fan T Y, Wen J G, Jiao Z H, Bian Z J, Zhong S Y, Zhu W Z, Cao B, Li H, Du Y M, Xiao Q and Liu Q H. 2024. Modeling the topographic effect on directional anisotropies of land surface temperature from thermal remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 4: 0226 [DOI: 10.34133/remotesensing.0226]
- Hang R L, Cao S J, Shang J, Ge L L, Shi C X and Liu Q S. 2025. Physical knowledge constrained convolutional network for temperature profile retrieval from FY-4A/GIIRS hyperspectral data. *Journal of Remote Sensing*, 5: 0841 [DOI: 10.34133/remotesensing.0841]
- Hou Z Q, Liu J Z, Xu Y G, Pang F C, Wang Y M, Qin L P, Liu Y, Zhao Y Y S, Wei G F, Xu M J, Jiang K, Hao C P, Ji S C, Zhu R Z, Yu B K, Liu J, Sheng Z F, Wang J T, Zhang C L and Li Y L. 2024. The search for life signatures on Mars by the Tianwen-3 Mars sample return mission. *National Science Review*, 11(11): nwae313 [DOI: 10.1093/nsr/nwae313]
- Huning L S and Brunner M I. 2026. Cascading impacts of natural disasters in a connected world. *Science*, 391(6792): 1320-1322 [DOI: 10.1126/science.adn8744]
- Irrgang C, Boers N, Sonnewald M, Barnes E A, Kadow C, Staneva J and Saynisch-Wagner J. 2021. Towards neural Earth system modelling by integrating artificial intelligence in Earth system science. *Nature Machine Intelligence*, 3(8): 667-674 [DOI: 10.1038/s42256-021-00374-3]
- Kang L H, Tian and Jiang B T. 2024. Challenges and research on remote sensing satellite application technology in the Giant Constellation Era. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(7): 1658-1666 (康利鸿, 田菁, 江碧涛. 2024. 巨星座时代遥感卫星应用技术挑战与思考. *遥感学报*, 28(7): 1658-1666) [DOI: 10.11834/jrs.20233248]
- Janconelli C, Gobron N, Robustelli M, Adams J S, Calders K, Disney M, Gastellu-Etchegorry J P, Goodenough A, Govaerts Y, Hogan R J, Huang H G, Kobayashi H, Kuusk A, Leroy V, Origo N, Qi J B, Schunke S, Leeuwen M, Wang Y J, Xie D H, Zeng Y L and Zhao F. 2025. The fifth phase of the radiation transfer model intercomparison exercise (RAMI-V): experiment description and results on actual canopy scenarios. *Journal of Remote Sensing*, 5: 0663 [DOI: 10.34133/remotesensing.0663]
- Li S T, Ma Q W, Wang Z Y, Min X W, Duan P H and Kang X D. 2025. Challenges, current status, and opportunities of multimodal alignment in remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1551-1565 (李树涛, 马启伟, 王志宇, 闵显文, 段普宏, 康旭东. 2025. 多模态对齐在遥感领域的挑战、现状与机遇. *遥感学报*, 29(6): 1551-1565) [DOI: 10.11834/jrs.20254457]
- Li Y, Yang K, Liu J Y, Zhang W S and Wang Y H. 2024. Remote sensing of surface meltwater routing in the Denmark Basin of the Northern Greenland Ice Sheet. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(6): 1433-1452 (李雅, 杨康, 刘金昱, 张闻松, 王裕涵. 2024. 格陵兰冰盖北部地区Denmark流域融水汇流过程遥感观测. *遥感学报*, 28(6): 1433-1452) [DOI: 10.11834/jrs.20242431]
- Liu S J, Liu J, Tan X Y, Chen X H and Chen J. 2024. A hybrid spatiotemporal fusion method for high spatial resolution imagery: fusion of Gaofen-1 and Sentinel-2 over agricultural landscapes. *Journal of Remote Sensing*, 4: 0159 [DOI: 10.34133/remotesensing.0159]

- Liu Y, Fan W J, Guo Q H, Huang Z, Ren H Z, Dong L, Zhang F and Lin P. 2026. Fusion sensing for urban resilience. *The Innovation*, 7(7): 101117 [DOI: 10.1016/j.xinn.2025.101117]
- Pan L, Xiao X M, Pan B H, Meng C, Doughty R, Qin Y W, Zhang C C, Yao Y, Yin C L and Yin S L. 2025. Vegetation photosynthesis model v3.0: improved estimates of terrestrial gross primary production from individual eddy flux tower sites to the globe. *Journal of Remote Sensing*, 5: 0471 [DOI: 10.34133/remotesensing.0471]
- Qi J B, Xie D H, Yin T G, Yan G J, Gastellu-Etchegorry J P, Li L Y, Zhang W M, Mu X H and Norford L K. 2019. LESS: large-scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes. *Remote Sensing of Environment*, 221: 695-706 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.036]
- Salesin K, Knobelspiesse K D, Chowdhary J, Zhai P W and Jarosz W. 2024. Unifying radiative transfer models in computer graphics and remote sensing, Part I: a survey. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 314: 108847 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2023.108847]
- Shen C P, Appling A P, Gentine P, Bandai T, Gupta H, Tartakovsky A, Baity-Jesi M, Fenicia F, Kifer D, Li L, Liu X F, Ren W, Zheng Y, Harman C J, Clark M, Farthing M, Feng D P, Kumar P, Aboelyazeed D, Rahmani F, Song Y L, Beck H E, Bindas T, Dwivedi D, Fang K, Höge M, Rackauckas C, Mohanty B, Roy T, Xu C G and Lawson K. 2023. Differentiable modelling to unify machine learning and physical models for geosciences. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(8): 552-567 [DOI: 10.1038/s43017-023-00450-9]
- Sicong Liu, Zhuoxian Zhang, Jie Zhang, Kecheng Du, Xiaohua Tong, Huan Xie, Yongjiu Feng and Tanmin Jin. 2025. LIBSFormer: Enhancing Mars in-situ LIBS data analysis with accurate and interpretable quantification of oxides. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 229, 107204
- Voigt S, Giulio-Tonolo F, Lyons J, Kučera J, Jones B, Schneiderhan T, Platzek G, Kaku K, Hazarika M K, Czarán L, Li S J, Pedersen W, James G K, Proy C, Muthike D M, Bequignon J and Guha-Sapir D. 2016. Global trends in satellite-based emergency mapping. *Science*, 353(6296): 247-252 [DOI: 10.1126/science.aad8728]
- Wang Y J, Kallel A, Zhen Z J, Lauret N, Guilleux J, Chavanon E and Gastellu-Etchegorry J P. 2024. 3D Monte Carlo differentiable radiative transfer with DART. *Remote Sensing of Environment*, 308: 114201 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114201]
- Wu H, Yu L, Du Z R, Zhao Q, Qi W C, Cao Y, Wang J Z, Shen X L, Sun Y and Ma K P. 2025. Rapid assessment of the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework implementation progress based on remote sensing monitoring: Pathway and prospects. *Biodiversity Science*, 33, 24526 (武慧, 俞乐, 杜贞容, 赵强, 戚文超, 曹越, 王金洲, 申小莉, 孙尧, 马克平. 2025. 基于遥感监测的“昆明框架”执行进展快速评估: 路径与展望. *生物多样性*, 33, 24526) [DOI: 10.17520/biods.2024526; cstr: 32101.14.biods.2024526]
- Wu K, Zhang Y Y, Ru L X, Dang B, Lao J W, Yu L, Luo J W, Zhu Z F, Sun Y, Zhang J H, Zhu Q, Wang J, Yang M, Chen J D, Zhang Y J and Li Y S. 2025. A semantic-enhanced multi-modal remote sensing foundation model for Earth observation. *Nature Machine Intelligence*, 7(8): 1235-1249 [DOI: 10.1038/s42256-025-01078-8]
- Xiao J F, Chevallier F, Gomez C, Guanter L, Hicke J A, Huete A R, Ichii K, Ni W J, Pang Y, Rahman A F, Sun G Q, Yuan W P, Zhang L and Zhang X Y. 2019. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111383 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111383]
- Xiao Q, Wu X D, Wen J G, Bian Z J, Lin X W, You D Q and Yin G F. 2025. Thoughts on the global validation of remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1739-1753 (肖青, 吴小丹, 闻建光, 卞尊健, 林兴稳, 游冬琴, 尹高飞. 2025. 全局性遥感真实性检验的思考. *遥感学报*, 29(6): 1739-1753) [DOI: 10.11834/jrs.20254466]
- Xing X Y, Yu B L, Kang C G, Huang B, Gong J Y and Liu Y. 2024. The synergy between remote sensing and social sensing in urban studies: review and perspectives. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 12(1): 108-137 [DOI: 10.1109/MGRS.2023.3343968]
- Yu L, Du Z R, Li X Y, Gu J T, Li X Y, Zhong L H, Duojiweise, Wu H, Zhao Q, Ma X R, Zheng J Q, Yang Y Z, Song W M, Wang P, Zhao Z C, Liao L Y, Long Y, Zhang Y G, Peng J B, Shen M G, Li T T, Sun Z T, Zhao Y G, Wu C Y, Lin G H, Luo Y and Peng D L. 2025. FROM-GLC Plus 3.0: multimodal land change mapping with SAM and dense surface observations. *Journal of Remote Sensing*, 5: 0728 [DOI: 10.34133/remotesensing.0728]
- Yu L, Gu J T, Wu H, Du Z R, Li X Y, Shen X L, Zhu L and Ma K P. 2025. Biodiversity early warning for the objectives of Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework. *Biodiversity Science*, 33, 2025329 (俞乐, 顾珈同, 武慧, 杜贞容, 李曦熾, 申小莉, 朱丽, 马克平. 2025. 面向《昆明框架》目标的生物多样性早期预警. *生物多样性*, 33, 25329) [DOI: 10.17520/biods.2025329; cstr: 32101.14.biods.2025329]
- Zerah Y, Valero S and Inglada J. 2024. Physics-constrained deep learning for biophysical parameter retrieval from Sentinel-2 images: inversion of the PROSAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 312: 114309 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114309]
- Zeng Y, Zheng Z J, Xu C, Zhao P, Ren L, Fu Y, Zhou Z F, Zhao X M, Wu J C, Yang S J, Li M Y, Zhao Y J, Zhao D and Wu B F. 2025. Monitoring plant diversity by remote sensing techniques: progress and perspective. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 2255-2275 (曾源, 郑朝菊, 许聪, 赵平, 任龙, 付颖, 周兆福, 赵雪茗, 武金琛, 杨世杰, 李明渊, 赵玉金, 赵旦, 吴炳方. 2025. 植物多样性遥感监测技术研究进展. *遥感学报*, 29(6): 2255-2275) [DOI: 10.11834/jrs.20255056]
- Zeng Y L, Hao D L, Huete A, Dechant B, Berry J, Chen J M, Joiner J, Frankenberg C, Bond-Lamberty B, Ryu Y, Xiao J F, Asrar G R and Chen M. 2022. Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3(7): 477-493 [DOI: 10.1038/s43017-022-00298-5]

- Zhang B, Chen Z C, Peng D L, Benediktsson J A, Liu B, Zou L, Li J and Plaza A. 2019. Remotely sensed big data: evolution in model development for information extraction [point of view]. *Proceedings of the IEEE*, 107(12): 2294-2301 [DOI: 10.1109/JPROC.2019.2948454]
- Zhang Y, Liu Q H, Tan L F, Huang H G, Ni W J, Yin T G, Qin W H and Sun G Q. 2017. A 3-D joint simulation platform for multi-band remote sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(11): 4763-4778 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2750223]
- Zhao C C, Wen J G, You D Q, Tang Y, Han Y, Liu G K, Wei K X, Wang H J and Liu Q H. 2025. Modeling top-of-atmosphere anisotropic reflectance of discrete forests over sloped surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63: 4407711 [DOI: 10.1109/tgrs.2025.3557557]
- Zhao H, Liu S C, Tong X H, Du Q, Bruzzone L, Du K C, Zhang J and Lu X N. 2024. MarsMapNet: a novel superpixel-guided multi-view feature fusion network for efficient Martian landform mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4600216 [DOI: 10.1109/tgrs.2023.3348931]
- Zhao X M, Zheng Z J, Schmid B, Zhao Y J, Zhao D, Wu B F and Zeng Y. 2026. Patterns and drivers of vegetation resilience across China and the negative impact of warm droughts. *Geography and Sustainability*, 7(3): 100448
- Zheng L, Shang X Y, van den Broeke M R, Noël B, Li X C, Fettweis X, Liang Q, Wang K, Liu J P and Cheng X. 2025. Rapid increases in satellite-observed ice sheet surface meltwater production. *Nature Climate Change*, 15(7): 769-774 [DOI: 10.1038/s41558-025-02364-4]
- Zhou Q, Liang Q, Xiao W X, Li T, Zheng L and Cheng X. 2025. Supraglacial lake depth retrieval from ICESat-2 and multispectral imagery datasets. *Journal of Remote Sensing*, 5: 0416 [DOI: 10.34133/remotesensing.0416]

Top ten frontier scientific issues in the field of remote sensing science and technology

ZHANG Bing¹, CHEN Jin², CHEN Zhengchao¹, CHEN Zuoqi³, CHENG Xiao⁴, FAN Wenjie⁵, LI Suju⁶, LIU Liangyun⁷, LIU Yu⁵, LIU Qinhuo¹, LIU Sicong⁹, MU Xihan², QI Jianbo², REN Huazhong⁵, SHI Qian⁸, SUN Xian¹, TIAN Qingjiu¹⁰, WAN Huawei¹¹, WU Xiaodan¹², WU Yirong¹, WU Yunzhao¹³, YAN Jun¹, YAN Kai², YAN Guangjian², YU Bailang¹⁴, YU Le¹⁵, ZHAO Yujin¹⁶, ZENG Yuan¹, ZHENG Zhaoju¹, ZHENG Lei⁴

1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
4. Sun Yat-sen University, Zhuhai 510275, China;
5. Peking University, Beijing 100091, China;
6. National Disaster Reduction Center of China (Satellite Application Center for Disaster Reduction), Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, Beijing 100124, China;
7. Beijing Normal University, Zhuhai 519080, China;
8. Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
9. Tongji University, Shanghai 200092, China;
10. Nanjing University, Nanjing 210000, China;
11. Satellite Environment Application Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China;
12. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
13. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 222122, China;
14. Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;
15. Department of Earth System Science, Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Institute for Global Change Studies, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
16. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: Remote sensing is a fundamental tool for understanding the Earth system. The integration of spaceborne, airborne, tower-based, and ground-based multi-platform collaborative observations with emerging technologies, including artificial intelligence, big data, and digital twins, is reshaping remote sensing paradigms. Traditional approaches based on static, single-sphere, and morphological observations are evolving toward a comprehensive framework that integrates dynamic, cross-sphere process inversion and 3-D perspective detection,

thereby accelerating the transformation of geoscience toward a data-driven and quantitatively analytical paradigm.

This study distills 10 cutting-edge scientific issues arising from the ongoing transformation of remote sensing and groups them into three major categories. The first category focuses on theory and modeling, covering multidimensional radiative transfer mechanisms, remote sensing foundation models and intelligent agents, and penetrating remote sensing of polar ice sheets. It aims to establish a unified modeling framework that integrates physical mechanisms with artificial intelligence. The second category centers on observational technologies, including virtual constellation collaborative observation, multimodal real-time data processing, as well as natural disaster monitoring and early warning, with an emphasis on advancing multi-platform collaboration and intelligent processing. The third category addresses systematic applications, involving carbon – water – energy cycle regulation, habitable planet exploration, human – environment system integration, and climate change impact assessment, aiming to meet critical scientific research and societal demands.

These three categories collectively underline three key development directions: the in-depth integration of remote sensing and artificial intelligence, the synergistic utilization of multi-source geospatial data, and the systematic upgrade of the “observation-to-decision” paradigm. Specifically, theoretical research prioritizes breakthroughs in fundamental mechanisms, technological research focuses on systematic engineering implementation, and applied research targets interdisciplinary practical deployment. Overall, remote sensing science is transitioning from conventional experience-driven approaches to a novel paradigm that integrates physical mechanism constraints and data-driven analytics, while evolving from static environmental monitoring toward dynamic prediction and intelligent decision-making. Future research efforts should prioritize interdisciplinary collaboration, open scientific platforms development, and international cooperation to address major global challenges, including climate change, natural disaster outbreaks, ecological degradation, and deep-space exploration.

Key words: radiative transfer, carbon-water-energy cycle, collaborative observation, remote sensing large model, AI intelligent processing, habitable planet, human-land system coupling, polar ice sheet, natural disaster, ecosystem