

中国冰冻圈遥感近期研究进展与若干前沿问题探讨

冉有华^{1,3}, 李新^{2,3}, 车涛^{1,3}, 冯敏^{2,3}, 朱金彪^{3,4}, 周玉杉⁵,
惠凤鸣⁶, 邱玉宝^{3,4}, 窦挺峰³, 李宜展⁷, 郑东海^{2,3}, 晋锐^{1,3}

- 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室 中国科学院黑河遥感试验研究站, 兰州 730000;
- 中国科学院青藏高原研究所 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室 国家青藏高原科学数据中心, 北京 100101;
- 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049;
- 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
- 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
- 中山大学 测绘科学与技术学院, 珠海 519082;
- 中国科学院文献情报中心, 北京 100190

摘要: 本文总结了近年来中国冰冻圈遥感研究的主要发展趋势。随着国产遥感技术进步和国际合作的深化, 中国冰冻圈遥感研究的广度和深度持续增加。在研究区域上, 从中国区域(特别是青藏高原)逐渐扩展到南北极及全球; 在遥感数据应用方面, 从以国外卫星遥感数据为主逐渐过渡到国外国内遥感数据(如高分卫星、风云卫星等)共用; 在遥感算法方面, 从早期依赖单一数据源、自动化程度较低的传统算法, 逐步发展为具有多源数据融合和智能化特征的新型算法体系。各种冰冻圈要素的遥感产品不断涌现, 为监测和深入理解中国 and 全球冰冻圈变化做出了重要贡献。本文还探讨了冰冻圈遥感透视能力、智能化算法研发、临界变化的遥感探测以及冰冻圈数据产品方面的前沿问题和潜在突破方向。面向冰冻圈科学进一步发展的新要求, 本文提出了3项重点行动倡议: 开展冰冻圈关键要素层析遥感综合试验、研发具有国际影响力的自主品牌冰冻圈数据产品、耦合遥感、模型和人工智能以增强冰冻圈预测能力, 旨在服务于气候应对与适应、灾害防治、生态保护、水资源管理和可持续发展等国家重大需求。

关键词: 积雪, 冻土, 冰川冰盖, 河湖海冰, 大气冰冻圈, 透视遥感, 人工智能, 临界变化, 数据产品

中图分类号: P2

引用格式: 冉有华, 李新, 车涛, 冯敏, 朱金彪, 周玉杉, 惠凤鸣, 邱玉宝, 窦挺峰, 李宜展, 郑东海, 晋锐. 2025. 中国冰冻圈遥感近期研究进展与若干前沿问题探讨. 遥感学报, 29(6): 1831-1847

Ran Y H, Li X, Che T, Feng M, Zhu J B, Zhou Y S, Hui F M, Qiu Y B, Dou T F, Li Y Z, Zheng D H and Jin R. 2025. Recent progress and emerging frontiers in China's cryosphere remote sensing research. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 1831-1847 [DOI: 10.11834/jrs.20255066]

1 引言

冰冻圈是指地球表层连续分布并具有一定厚度的负温圈层, 其主要组成包括冰川、冰盖、冻土、积雪、河湖冰、海冰、大气中的固态水(如雪花、冰晶、冰雹、霰等)(施雅风和程国栋, 1991; 程国栋, 1996; 秦大河, 2014; 秦大河等, 2020)。冰冻圈是地球气候系统中最为活跃的部分(施雅风和程国栋, 1991; 程国栋, 1996),

具有高表面反射率、巨大的冷能储量、相变潜热、淡水资源储量和碳库, 同时具有独特的导水、导热和承载力特性, 与气候、水循环、生态系统、灾害发生等密切相关, 在地球系统科学和人类社会可持续发展中有着特殊而重要的地位。2024年, 联合国大会宣布“冰冻圈科学行动十年”(2025年—2034年), 以促进对冰冻圈变化影响的应对和人类可持续发展。

中国是中低纬度冰冻圈最发育、全球山地冰

收稿日期: 2025-02-25; 预印本: 2025-04-07

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2024YFF0729100)

第一作者简介: 冉有华, 研究方向为冻土地理和冰冻圈遥感。E-mail: ranyh@lzb.ac.cn

通信作者简介: 李新, 研究方向为陆面数据同化、水文和冰冻圈遥感及流域集成研究。E-mail: xinli@itpcas.ac.cn

冻圈面积最大的国家 (Li 等, 2008), 也是受冰冻圈变化影响最显著的国家之一。气候变化带来的冰川退缩、冻土退化等现象不仅影响中国本身, 也对周边国家甚至全球的气候、水资源和生态格局产生重要影响。

遥感是监测冰冻圈最为重要的技术手段之一, 冰冻圈遥感是冰冻圈科学体系的重要组成部分 (李新 等, 2020; 车涛 等, 2020)。近几十年来, 中国遥感科学家紧跟国际冰冻圈科学的前沿, 研究视野逐渐从国内转向全球, 新方法和新技术不断涌现, 数据产品不断积累和提升, 冰冻圈遥感研究取得了显著进展, 历程如图 1 所示。2006 年, 中国第一本《冰冻圈遥感》专著出版 (曹梅盛 等, 2006), 2016 年, 中国冰冻圈科学学会 (筹) 成立了冰冻圈遥感与信息专业委员会, 2019 年, 多个冰冻圈相关科学数据中心成立, 如国家青藏高原科学数据中心、国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 冰冻圈科学数据共享进入新阶段 (Li 等, 2020b), 2020 年出版了中国第一本《冰冻圈遥感学》教材

(李新 等, 2020), 2024 年召开了第一届中国冰冻圈遥感与大数据学术研讨会, 推动了中国冰冻圈遥感与大数据的学术交流, 反映了中国冰冻圈遥感研究的最新进展。总体来看, 中国冰冻圈遥感在大数据与人工智能等技术的加持下, 数据产品空前丰富, 一系列基于中国国产卫星的冰冻圈数据产品发布, 精度和分辨率都越来越高, 应用领域也越来越广泛, 为理解冰冻圈变化、冰冻圈灾害防治等提供了重要信息。

然而, 面对全球冰冻圈加速变化及其复杂广泛影响的新要求, 中国冰冻圈遥感研究在透视图测能力、智能化、理论和数据产品方面仍面临新的挑战。值此《遥感学报》创刊 40 周年之际, 我们简要回顾了近年来中国冰冻圈遥感与大数据领域的最新进展, 探讨了冰冻圈遥感透视能力、智能化算法研发、临界变化的遥感探测以及冰冻圈数据产品方面的前沿问题和潜在突破方向, 并提出了具体行动建议, 以期为中国冰冻圈遥感的进一步发展提供思路。



图 1 近十年来中国冰冻圈遥感与大数据研究发展的历程

Fig. 1 Key events in the development trajectory of remote sensing and big data research on the cryosphere in China over the past decade

2 中国冰冻圈遥感研究进展

基于文献计量分析, 2019 年以来中国学者在冰冻圈遥感研究领域取得显著进展, 共发表 WOS 核心库期刊论文 2422 篇, 第一作者和通讯作者占 95%。如图 2 所示, 中国冰冻圈研究与气候变化最为密切, 研究区域主要集中于青藏高原、北极和南极 3 大热点区域; 研究方法和技术手段方面, 机器学习、深度学习等人工智能技术得到广泛应用, 冰冻圈目标识别、SAR、InSAR、微波辐射计、GNSS-R 等遥感技术持续深化, GEE 平台及 MODIS、

Landsat、Sentinel-2、Cryosat-2 等国外卫星数据和 GF-3 和 FY-3D 国产卫星数据源使用频率较高。从国际合作网络来看 (图 3), 中国已与 28 个国家建立了稳定的科研合作关系, 其中与美国合作最为紧密, 合作论文数量居首; 其次与德国、英国、加拿大、芬兰等发达国家以及巴基斯坦等“一带一路”沿线国家保持密切合作。研究对象以积雪、海冰、冰川、多年冻土为主, 表面要素全面覆盖, 逐渐从表层向近表层及浅层内部结构方向发展 (图 2, 图 4)。

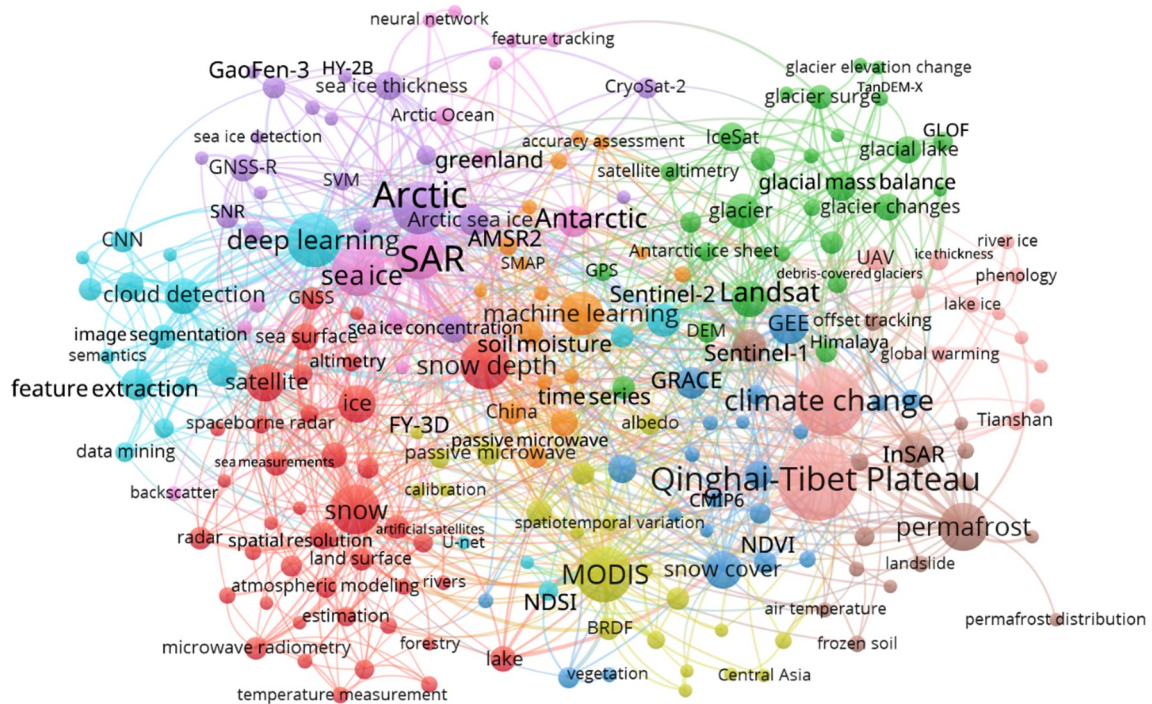


图2 2019年以来中国冰冻圈遥感研究的热点主题 (WOS核心库,时间范围:2019-01—2025-02, 检索词:Ts=((Cryosphere or glacier or “ice sheet” or snow or permafrost or “sea ice” or “river ice” or “lake ice”)) and ((Ts=“remote sensing” or Wc=(Remote sensing)) and CU= China)

Fig. 2 Hot topics in China’s cryosphere remote sensing studies since 2019 (WOS Core Collection, time range: January 2019—February 2025, Search terms: Ts=((Cryosphere or glacier or “ice sheet” or snow or permafrost or “sea ice” or “river ice” or “lake ice”)) and ((Ts=“remote sensing” or Wc=(Remote sensing)) and CU= China)

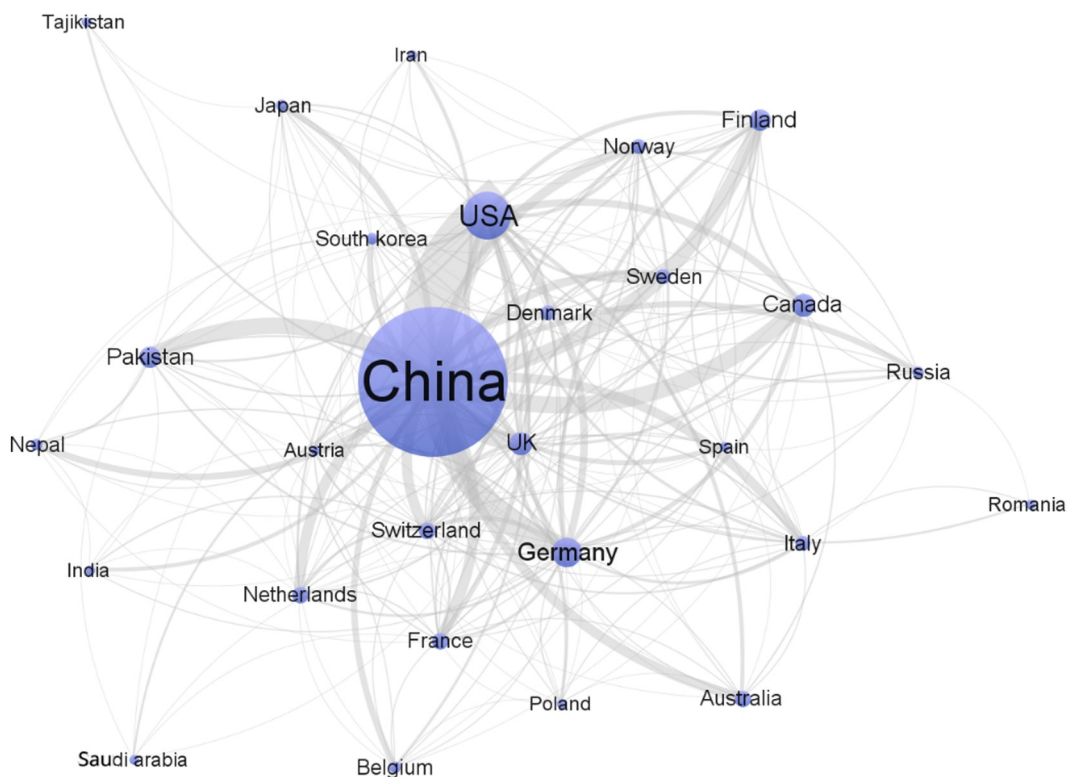


图3 2019年以来中国冰冻圈遥感研究方面的国际合作形势(合作发文不低于5篇的国家共28个)

Fig. 3 International cooperation in China’s cryosphere remote sensing research since 2019 (28 countries with at least five co-authored publications)

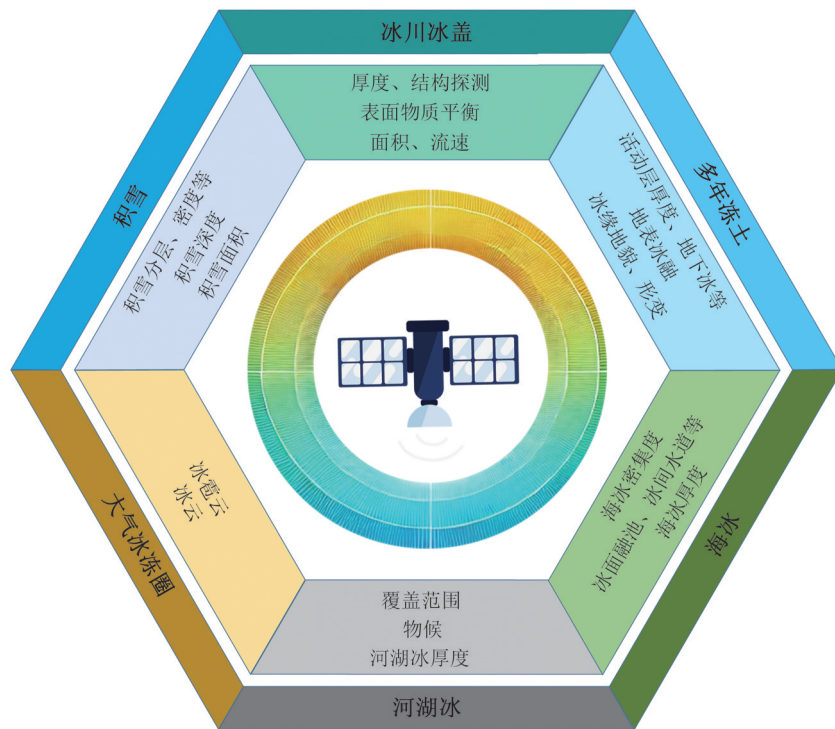


图4 2019年以来中国冰冻圈遥感主要要素(离中心越远代表成熟度越低)

Fig. 4 Major variables of cryosphere remote sensing in China since 2019 (The farther from the center, the lower the maturity)

2.1 冰川冰盖遥感

在山地冰川遥感监测算法发展方面,建立了基于冰川反照率的物质平衡变化反演方法(Liu等, 2024),并对冰川监测中的常用方法进行了改进,如DEM配准(Li等, 2023d)、DEM差分自动化处理(Zhou和Duan, 2024)以及稳健的冰川流速获取技术等(Shi等, 2024a)。在新技术应用方面,深度学习技术已成功用于冰川边界识别及面积变化监测(Chu等, 2022),特别是表碛覆盖区识别(Lu等, 2021)。以DEM差分法为主要手段,利用历史地形图、光学立体测绘卫星(如KH-9、ASTER、ZY-3等)和双基干涉SAR卫星(如TanDEM-X)数据在整个亚洲高山区开展了多时间尺度(年代际、多年际和年际)的冰川物质平衡监测(Liu等, 2019; Zhou等, 2018; 李佳等, 2024; 周玉杉等, 2024),并探索了多源测高卫星数据在季节性冰川物质平衡变化估计中的潜力(Wang等, 2021a; Zhao等, 2022a)。针对当前TomoSAR研究由于忽略气-冰折射而导致三维聚焦精度低的问题,发展了一种新型算法,通过将折射路径计算集成到合成孔径雷达图像聚焦中,以及通过堆叠InSAR相干图像来构建三维TomoSAR立方体,解决了在信噪比较低的情况下也能反演

深层基岩信号的难题,首次利用机载TomoSAR技术成功绘制了祁连山八一冰川的冰层厚度图,精度优于5 m(Wang等, 2025)。此外,结合卫星遥感数据和经验模型估算了喜马拉雅地区冰湖接触型冰川的水下质量损失,发现此前研究中冰湖接触型冰川的总质量损失被低估了6.5%(Zhang等, 2023a)。在数据产品制备方面,已生产了冰川长度、冰川跃动和冰川编目等基础数据集(Guo等, 2023; Xie等, 2023; Zhang等, 2022a)。

在极地冰盖遥感监测方面的进展主要体现在面积、冰流速、冰面高程和冰面融水等方面。例如,发展了针对ARGON等历史影像数据的摄影测量处理新方法(如视差分解法、分层网络密集化方法等),成功提取了南极冰盖历史冰川流速和冰川高程(Feng等, 2023b; Li等, 2017),并通过与现代卫星观测相结合,重建了Totten冰川近50年的冰川运动数据集(Li等, 2023c)。此外,发展了基于新遥感数据集驱动的输入输出法和多方法集成的冰盖物质平衡估计策略(如输入输出法、卫星测高法和重力反演等方法),获取了1996年—2021年间南极冰盖的质量变化,发现冰损失量达到 $\sim 3213 \pm 253$ Gt(Li等, 2024b)。针对ICESat-2数据发展了多时态的高程变化估算模型,将降水与

地形影响分离并通过时空迭代处理有效地估算了冰盖高程变化速率 (Li 等, 2024a)。在数据产品制备方面, 生产了南极冰盖空间分辨率为 105 m 的年际 (2013 年—2019 年) 冰流速数据产品 (Shen 等, 2021); 更新了两极冰盖外围的冰川编目 (Liu 等, 2023a), 生产了南极地区 2005 年—2020 年期间冰山崩解记录的数据集 (Qi 等, 2021); 基于 Sentinel-2 影像, 通过半自动化的多尺度水体提取算法结合区域大气模式, 获取了 2018 年和 2019 年夏季 10 m 分辨率的格陵兰冰盖地表水范围和体积 (Zhang 等, 2023b; 李雅等, 2024)。此外, 全球卫星导航系统 (GNSS) 被成功应用于基岩垂直位移变化的探测, 揭示了格陵兰冰盖内部夏季存在大量的融化滞水现象 (Ran 等, 2024)。

可见, 中国在冰川冰盖传统参数 (面积、流速和表面物质平衡等) 遥感反演方面取得了全面发展, 并在冰内结构探测、冰川厚度遥感反演方面开展了初步尝试, 如何综合低频 SAR (层析)、核磁共振、冰雷达、航空电磁、航空重力等手段, 实现冰内结构和冰川厚度探测能力的突破, 是亟待进一步努力的方向。

2.2 积雪遥感

积雪遥感的主要参数包括积雪面积和积雪深度。其中, 积雪面积主要通过光学遥感监测, 相关算法已相对成熟。在积雪二值遥感产品方面, 近年来发展了考虑地形条件和植被类型差异的归一化差值积雪指数 (NDSI) 动态阈值算法 (Hao 等, 2021; Wang 等, 2018), 研发了大量产品, 如基于 MODIS/AVHRR 的中国积雪二值产品 (Hao 等, 2021, 2022) 以及青藏高原积雪面积二值产品 (Huang 等, 2022)。积雪覆盖率遥感方面, 近年来涌现出许多新算法, 主要包括机器学习与光谱和环境信息结合方法 (Sun, 2022; 高伟强等, 2024)、混合像元分解方法 (Pan 等, 2024; Zhao 等, 2020)、深度学习算法 (Hou 等, 2020) 以及积雪辐射传输模型约束下的深度学习模型 (Zhao 等, 2020) 等。云/雪混淆问题可能是光学积雪面积产品中最大的不确定性因素。为恢复云下积雪覆盖情况, 发展了多种针对积雪面积产品的去云算法, 主要包括时间序列插值 (Li 等, 2019)、时空插值 (Jing 等, 2019)、多源数据融合 (Hao 等, 2022) 和机器学习 (Huang 等, 2020, 2021) 等方法。

探测积雪深度的遥感技术主要有被动微波遥感、SAR、InSAR 和 Lidar 等 (Dai 等, 2018)。其中, 被动微波遥感技术最为成熟, 近年来主要通过融合多源数据进一步提高了复杂下垫面雪深的估计精度, 并研制了多个全球和区域尺度的被动微波遥感雪深产品。例如, 通过考虑土地覆盖类型对雪深反演的影响, 并引入新的森林结构指数, 提高了林区雪深反演的精度 (Yue 等, 2024); 基于中国积雪特性调查数据生产了中国雪深和雪水当量产品 (Jiang 等, 2022); 利用机器学习方法融合了多个雪深遥感产品和再分析产品, 发展了精度更高的北半球雪深数据产品 (Hu 等, 2021)。近年来被动微波也被用于海冰上的积雪深度的反演 (He 等, 2022, 2023, 2024)。然而, 由于被动微波空间分辨率较低, 大尺度雪深产品难以满足精细尺度应用需求 (王静等, 2023)。为此, 结合可见光积雪面积和被动微波雪深产品的降尺度算法 (Dai 等, 2018) 以及无人机 Lidar (Feng 等, 2023a) 等算法的发展, 提高了雪深探测的空间分辨率。值得注意的是, 以上这些方法都是反演积雪的整体深度, 有些算法甚至需要复杂的积雪特性作为先验信息。而 SAR 层析技术的出现为积雪内部结构的精细探测提供了新的技术途径。2013 年欧洲航天局的地基 SAR 实验表明, SAR 层析技术能够对厚层积雪的内部结构进行探测, 并获取分层的积雪深度信息 (Tebaldini 和 Ferro-Famil, 2013)。2023 年, 中国学者在阿勒泰开展了无人机载层析 SAR 实验, 利用层析 SAR 技术初步解析了积雪分层厚度信息 (Qiao 等, 2023), 这是积雪深度垂向精细反演的重要尝试。未来, 针对厚层积雪的内部结构 (如分层、密度、深霜层等) 的高频 SAR (层析) 方法是值得重点关注的研究方向。

2.3 冻土遥感

冻土一直是极具挑战性的冰冻圈遥感探测目标, 近年来的研究进展主要体现在地表土壤冻融状态、冰缘地貌的遥感分类与识别、多年冻土分布制图以及基于 InSAR 形变信息的活动层和地下冰融化估计等方面。在地表冻融方面, 通过引入冻土介电模型并考虑积雪折射效应, 基于 L 波段被动微波遥感实现了土壤未冻水含量的反演 (Wang 等, 2024a); 研发了被动微波与热红外遥感的融合方法, 将地表土壤冻融状态产品的空间分辨率

从 0.25° 提高到 0.05° (Zhao等, 2017), 并研制了全球数据产品。在冰缘地貌方面, 中国地区最为典型的冰缘地貌要素 (如石冰川、热融滑塌、热融湖塘等) 的遥感产品不断涌现, 其质量、覆盖范围和时间序列均有显著提升。例如, 基于高分辨率 Planet 底图影像, 利用深度学习分类结合人工修正, 发现青藏高原共有石冰川 44273 条, 总面积约 6000 km^2 (Sun等, 2024)。基于国产高分系列卫星和 PlanetScope 等卫星图像, 在青藏高原多年冻土区识别出 2669 处热融滑塌 (Luo等, 2022), 并发现 2016 年—2022 年期间青藏高原热融滑塌面积总体增加了 2.8 倍 (Xia等, 2024)。

除了上述“直接”遥感探测以外, 遥感技术还为多年冻土提供了非常重要的间接环境指标。这些指标为更好地估计多年冻土的分布状态提供了精细信息。例如, 通过综合地面观测与遥感获取的一系列环境指标, 研发了青藏高原和北半球新一代多年冻土图, 并发布了高精度年平均地温与活动层厚度数据产品 (Ran等, 2021)。另一方面, InSAR 地表形变信息也被尝试用于估算最大融化深度和地下冰融水量, InSAR 长期形变信号可与地下冰融化建立联系, 从而有潜力用于地下冰融化的监测 (Wang等, 2023a, 2023b; Zhang等, 2024b)。

总之, 冻土遥感的地表应用越来越成熟, 相关产品越来越丰富, 开放程度进一步增强。冻土遥感的地下应用也初现曙光, 未来如何突破大区域多年冻土监测能力, 综合利用 GNSS、分布式光纤等新型观测手段, 实现未冻水、活动层厚度和地下冰的探测, 是冻土遥感亟需突破的重要方向。

2.4 海冰遥感

近年来, 中国学者在海冰遥感方面的研究进展迅速, 主要呈现以下几方面的特点。第一, 海冰遥感的参数多样化, 海冰密集度、海冰厚度、海冰漂移等传统参数的反演精度和空间分辨率得到了进一步提升, 而冰面地形、冰面融池、冰间水道等新兴参数逐渐受到关注。例如, 发展了基于 MODIS 热红外数据的海冰密集度反演算法, 精度相比传统算法 MPA (MODIS potential open water algorithm) 提升 3.5% (Ye等, 2024); 通过引入 MODIS 和 FY-3D 热红外数据, 精细刻画了百米至千米尺度的北极冬季冰间水道分布特征 (Qu

等, 2021; Wang等, 2022a); 同时, 发展了面向 SDGSAT-1 热红外与 Sentinel-1 SAR 数据的冰间水道识别算法, 有效提升了对北极细小冰间水道的提取能力, 深化了对北极冰间水道分布规律的理解 (Chen等, 2024; Qiu等, 2023)。第二, 国产卫星广泛应用于海冰监测, 丰富了海冰多参数遥感反演能力。例如, 通过改进动态系数算法, 国产 FY-3 和 HY-2 系列卫星的海冰密集度反演精度与国际同类产品相当 (Shi等, 2021; Zhao等, 2022b); 中法海洋卫星、HY-2A 和 FY-3E 等卫星散射计也被用于大尺度海冰监测 (Zhai等, 2024; Zhang等, 2022b)。第三, 反演模型精细化和智能化, 传统物理模型加入多元化时空变化参数以提升反演能力, 人工智能模型广泛应用于海冰类型识别、冰间水道提取等研究中并取得显著成效。例如, 通过发展基于模式识别和偏移追踪的海冰漂移监测算法, 实现了面向微波辐射计、可见光、SAR 等多尺度数据的北极海冰漂移的高精度遥感监测 (Wang等, 2023c, 2024b); 利用机器学习和深度神经网络, 实现了基于 SAR 数据的高分辨率海冰分类, 提升了区域尺度海冰类型的精细化监测能力 (Chen等, 2020; Huang等, 2024)。得益于算法的发展, 多种高质量的海冰遥感产品不断涌现。如基于 Cryosat-2 的 2010 年—2019 年北极冬季海冰厚度月度产品 (Xiao等, 2021); 基于 AMSR-E/AMSR-2 数据的 2003 年—2022 年南极海冰密集度产品和冰间湖分布产品 (Lin等, 2024)。

2.5 河湖冰遥感

河湖冰遥感监测的关键参数包括覆盖范围、厚度和物候等 (童洁等, 2024)。近年来, 中国河湖冰遥感算法研究快速发展, 特别是在应对云污染、积雪干扰和冰厚反演等问题上取得了显著进展。针对光学影像中的云污染, 基于时空连续性的去云算法能够有效揭示云覆盖下湖泊与河流的冻结状态 (Qiu等, 2019; Zhang等, 2024a); 基于可见光与热红外数据的随机森林两步分类法, 可以有效识别湖冰覆盖, 特别是在薄冰识别方面效果显著 (Xu等, 2024); 相较于经典的归一化积雪指数算法, 基于光谱特征的相对差分河冰识别算法能够更好地克服积雪干扰, 适用于不同海拔、不同形态的河冰监测 (Li等, 2021); 在湖冰厚度方面, 基于卫星测高雷达的波形分析算法实现了

不依赖经验参数的高精度湖冰厚度反演 (Li 等, 2022d)。此外, 无人机雷达测厚技术的发展为卫星河湖冰厚度遥感产品提供了更加可靠的验证数据 (刘辉等, 2020; 靳惠安, 2021)。

随着遥感数据的积累和算法的发展, 涌现出越来越多的河湖冰遥感产品。在被动微波遥感产品方面, 基于 SMMR、SSM/I 和 SSMIS 长时间序列微波辐射计亮温观测, 利用湖冰和开阔水域的亮温差阈值, 研制了 1979 年—2019 年北半球 56 个大型湖泊的湖冰冻融物候数据集 (Cai 等, 2022; Wang 等, 2022b)。在光学遥感产品方面, 多阈值 Fmask 算法被应用于 Landsat 影像的冰水分类, 研制了 1985 年—2020 年北温带 (23.5°N — 66.5°N) 33000 多个湖泊的 30 m 分辨率冰覆盖和逐年湖冰覆盖频率数据产品, 总体精度可达 93.9% (Wang 等, 2021b); 基于 Landsat 8/9 与 Sentinel-2 A/B 系列影像, 开发的集成机器学习模型识别湖冰的整体精度可达 96.9%, 并成功提取了青藏高原可可西里地区 372 个小型湖泊的湖冰物候信息 (Tong 等, 2024); 基于 MODIS 数据生成的叶尼塞河流域 2002 年—2021 年逐日河冰覆盖度产品, 以 12.5 km 分辨率精细刻画了流域尺度的河冰演化过程 (Zhang 等, 2024a); 基于 Landsat 影像对八宝河流域河冰变化进行长时间序列监测 (1999 年—2019 年), 揭示了青藏高原流域尺度河冰的分布特征及变化趋势 (Li 等, 2020a)。

目前, 中国河湖冰遥感研究主要集中在范围和物候方面, 而对河湖冰本身物理特性的关注较少。现有的 InSAR、GNSS 等卫星数据尚未被广泛应用于河湖冰遥感, 新型算法和产品的开发将有助于进一步促进对河湖冰过程和水文效应的理解与认识。

2.6 大气冰冻圈遥感

大气冰冻圈是空间分布最广的冰冻圈要素, 中国学者基于目前国际上先进的主被动融合 DARDAR 卫星观测数据, 估算了全球大气冰冻圈的冰量约为 63 Gt (许高洁等, 2022), 远小于全球冰川 (冰盖) 及多年冻土的含冰量, 较全球积雪量低 1—2 个数量级。近年来, 大气冰冻圈遥感主要围绕冰云和冰雹云等要素展开。在冰云遥感方面, 中国学者开发了 Voronoi 冰晶散射模型, 以 Voronoi 多面体代替冰晶的复杂形状构建冰晶散射

数据库, 提出最具代表性冰晶模型来反演冰云微物理参数的方法, 在卫星反演冰云微物理参数方面具有较好的性能, 已被应用于 GCOM-C 以及 Himawari-8 官方冰云产品的研发 (Letu 等, 2016, 2019; Li 等, 2022b, 2023a)。中国 GF-5 01/02 星上搭载的目前世界上唯一在轨的大气气溶胶多角度偏振探测仪 (DPC), 通过对云进行多角度偏振观测, 提高了云参量反演能力 (Shang 等, 2020; 王宇瑶等, 2022)。对冰雹的遥感监测, 目前重点是针对冰雹多发区, 结合光学遥感、闪电定位系统、冰雹云雷达回波等, 发展冰雹云的识别算法, 提高冰雹的临近预报能力 (Jing 等, 2022; Li 等, 2023b; 阮悦等, 2023; 徐小红等, 2022)。

中国在大气冰冻圈遥感研究方面进步较快, 未来可加强新型传感器的研发和应用, 进一步提高大气冰冻圈的探测能力。首先, 太赫兹波段对冰云遥感有重大应用潜力, 中国在“十三五”期间开展了太赫兹冰云探测仪预研工作 (陈柯等, 2022), 提出了下一代风云气象卫星将搭载太赫兹冰云辐射计的计划, 未来该计划的实施将有助于提高冰云微物理参数的观测能力。另外, 高轨主动仪器的研制也同样重要, 一旦取得进展可大幅提高大气冰遥感探测的时间分辨率, 对于开展大气冰冻圈三维结构的大尺度和精细化研究具有重要意义。

3 冰冻圈遥感的几个前沿问题探讨

近年来, 中国在冰冻圈遥感研究领域取得了显著进展, 尤其在遥感算法、数据产品和应用等方面, 涌现出一系列重要成果, 为理解全球冰冻圈变化做出了中国贡献。随着研究规模和深度的快速扩大, 未来在观测能力、智能化水平、临界变化过程理解和数据产品等方面有望实现新的突破, 通过提供观测、数据和提升预测能力为冰冻圈数字孪生平台提供支撑 (图 5)。下面将重点探讨这些关键问题, 以期抛砖引玉, 凝聚共识, 协同发力, 促进对这些问题的深入研究。

3.1 增强冰冻圈遥感透视能力

冰冻圈透视遥感传感器主要包括冰雷达、冰川层析成像雷达、冻土主被动微波探测仪等。冰雷达是通过雷达回波分析研究冰雪介质的特征的一种地球物理探测系统, 电磁波在冰川内部传播呈现

弱衰减性，以及冰川良好的成层性和匀质性是冰雷达探测冰厚的理论基础（崔祥斌等，2009）。机载冰雷达是当前冰川透视观测的主要传感器，可以获取飞行测线下方冰体的立体剖面反射信号，且正在向多频段（14—600 MHz）、多极化（HH/VV/HV/VH）、多通道（2—24个通道）方向发展（Arnold等，2020），具有穿透能力强、精度高、信息量大等优点，可以映射冰下地形，并实现对冰下基岩的成像（Al-Ibadi等，2017），其条带成像宽度2 km、水平分辨率（沿轨迹和跨轨迹）小于25 m（Rodriguez-Morales等，2014），垂直分辨率可达到米级甚至分米级，最大探测深度超过5000 m。

2024年9—11月，中国科学院空天信息创新研究院利用航空冰雷达与三维激光雷达，完成了对老虎沟12号冰川、七一冰川、宁缠河3号冰川的冰储量调查；同期，中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心集成航空重力和冰雷达在西昆仑开展了冰川厚度和冰储量调查，这些试验对于促进冰川厚度的透视能力具有重要意义。然而，现有机载冰雷达受限于天线尺寸、波长、阵列通道数等因素，导致下视探测观测幅宽较窄，极区依然存在较大的观测盲区。因此，亟待发展高时空分辨率的冰雷达星座系统或分布式机载多通道冰雷达。

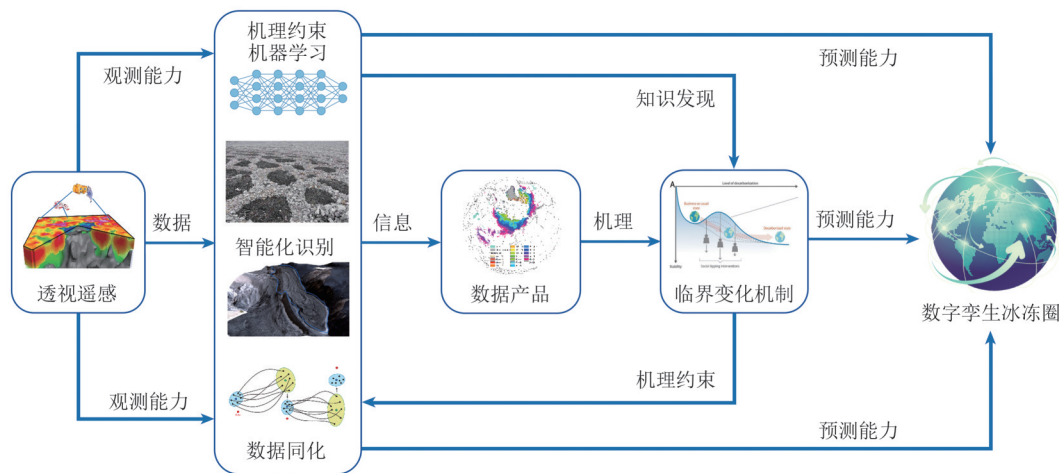


图5 观测—数据—信息—知识—决策框架下的中国冰冻圈遥感研究的几个前沿方向及其关系
Fig. 5 Several frontiers and their relationships in China's cryosphere remote sensing research under the observation-data-information-knowledge-decision framework

冰川层析成像雷达相对于测深冰雷达探测深度不足，但其水平分辨率和地表杂波抑制能力较强，适用于平均厚度几百米的山地冰川精细探测。近年来，国内外针对山地冰川开展了多次机载SAR层析成像观测实验。例如，欧洲航天局（ESA）在2014年—2016年期间开展的AlpTomoSAR实验研究获取了P波段和L波段SAR的冰川内部层析图像（Tebaldini等，2016）。2023年，中国科学院在祁连山八一冰川开展了中国首次P/L-TomoSAR冰川透视航空遥感试验，成功获取了八一冰川完整的冰下地形三维图像，实现了山地冰川三维透视观测。其中L波段和P波段SAR可以分别实现超过50 m和100 m深度的三维冰底属性获取，冰川内部散射体定位精度优于2—3 m，可以实现水平方向米级分辨能力（Wang等，2025）。然而，相对于测深冰雷达，SAR信号穿透冰介质能量损耗较为

严重，山地冰川周边、冰内和冰底不同介质层信噪比低，背景旁瓣噪声较大，多层散射或反射信号混叠，亟待研究构建考虑气—雪—冰—岩多层介质、折射与散射特性及内部结构先验的成像方法（江利明等，2024），以提升山地冰川浅层层析成像质量。

微波遥感冻土透视探测目前还处于探索阶段。目前，被动微波遥感传感器主要使用P、L、C、X、Ku、Ka波段，主要用于土壤冻融状态制图（Chen等，2019；Du等，2014；Hajnsek等，2009；Tabatabaenejad等，2015；V aaja和Hallikainen，2013）。不同波段对冻土探测的深度各异，其中高频波段（如Ku、Ka波段）的穿透深度大约为1—2 cm，低频波段（如L、C、X波段）的穿透深度约为2.5—15 cm，P波段则能够探测约60 cm深的冻土活动层厚度（取决于土壤含水量）。目前还缺

少冻土活动层厚度的直接探测手段，亟待发展低频段（如VHF波段和P波段）主动微波冻土遥感传感器，通过对冻土的介电特性进行建模和测量，建立冻土系统的理论散射模型，从而提高冻土活动层的直接探测能力。

冰川冰盖和多年冻土的内部结构（如冰层分布、融水通道、冰楔、融区和地下冰）直接影响其动力学行为，观测这些内部结构的演化特征是研究其动力学机制、评估其稳定性的基础。增强冰冻圈遥感透视能力，首先需要开展一次冰冻圈关键要素层析遥感综合试验，重点针对冰川、积雪和浅层多年冻土（表1），综合利用P-SAR、高频SAR、核磁共振、冰雷达、航空电磁、航空重力等探测技术和传感器，系统评估其在复杂冰冻圈内部结构探测方面的能力，发展综合方法，突破冰川内部结构（冰下水流、沉积物等）、冰川厚度、积雪结构（分层、密度、深霜层等）、积雪厚度、浅表层冻土未冻水、季节冰等关键要素的直接探测能力。

表1 冰冻圈层析遥感综合试验优先观测对象与要素
Table 1 Priority observation targets and elements for cryosphere tomographic remote sensing integrated experiments

观测对象	观测要素	探测技术/传感器
冰川	冰内结构 (冰下水流、沉积物等)	P-SAR(层析)、核磁共振 测深冰雷达、航空电磁
	冰川厚度	P-SAR(层析) 测深冰雷达、航空重力
积雪	积雪结构 (分层、密度、深霜等)	高频SAR(层析)
	积雪厚度	高频SAR(层析)
冻土	未冻水储量 (浅表层)	核磁共振、瞬时电磁 P-SAR(层析)
	地下冰 (浅表层季节冰)	核磁共振、测深冰雷达 P-SAR(层析)

3.2 提升冰冻圈遥感智能化水平

随着遥感数据的快速积累和类型多样化，冰冻圈遥感数据呈现出明显的大数据特征，但也给其数据分析能力提出了新的挑战。人工智能已经在遥感数据的高效处理、冰冻圈特征提取、冰冻圈目标识别与预测方面表现出强大的能力（Li等，2023e）。从第2部分冰冻圈要素遥感最新进展的综述可见，几乎所有目前可探测的冰冻圈要素都得益于机器学习算法的应用，实现了效率和精度

的显著提升，特别在冰川消融速度（Li等，2022a；Rajat等，2022）、冰盖质量平衡（Hu等，2021；Shi等，2024b）、海冰范围和厚度变化（Andersson等，2021；Song等，2024；Wang和Li，2021）、多年冻土退化趋势（Hu等，2024；Liu等，2023b；Philipp等，2022）等方面显示出重要潜力。对于难以直接观测的冰冻圈要素，如冰川内部结构、多年冻土的稳定性、地下冰等，人工智能也能够通过数据挖掘或与专家知识的结合提供有价值的信息（Li和Guo，2025；Ran等，2021）。

然而，冰冻圈遥感的智能化水平仍处于初级阶段，存在巨大的发展空间。近年来，一系列新的深度学习模型和算法不断涌现，如图神经网络、生成对抗网络、Transformer架构等，这些新技术为冰冻圈要素遥感反演、估计、知识挖掘和预测的突破带来新的可能。以下以3个代表性的发展方向为例来进一步探讨。第一，冰冻圈目标的无标签智能识别。人工智能方法高度依赖训练数据，而冰冻圈要素常分布在偏远地区或极端环境中，获取足量的高质量标注数据往往颇具挑战，发展自监督和强化学习的冰冻圈目标识别和解析算法可能是有潜力的方向之一。第二，机理与数据双驱动的冰冻圈变化模拟。针对复杂的冰冻圈变化过程和机制，进一步发展冰冻圈多源数据同化和机理约束的机器学习方法，提高冰冻圈变化的预测能力。特别是在人工智能模型中如何更好地融入机理约束和先验知识，提升人工智能模型的长期预测能力、物理一致性和可解释性（Li等，2023e）。第三，冰冻圈过程人工智能自主分析，自主提出假设。在大量冰冻圈数据中寻找变量之间的潜在因果关系，创新性地自主提出假设，揭示冰冻圈的物理过程，提升对冰冻圈的模拟及预测能力（Li和Guo，2025）。

3.3 促进冰冻圈临界变化的理解

临界变化是指某一系统内部及外部多种因素复杂的相互作用，导致系统状态在达到某个阈值或临界点时，驱动条件的微小变化会触发系统的强烈非线性响应，从一种稳态转变到另一种稳态，这种状态突变相对于某一状态的内部变化通常是快速和不可逆的。冰冻圈的临界变化则是指冰冻圈所在系统的状态变化，且与气候系统、水文系统和生态系统均密切相关。例如，在气候系

统的16个临界要素中,有9个与冰冻圈紧密关联(McKay等,2022)。相对于渐变过程,冰冻圈临界变化具有随机性、强烈非线性和高影响力,更加难以预测和适应,因此成为《Science》2021年提出的125个科学前沿问题之一:如果地球上所有的冰融化会怎样?它也是欧盟2024年提出的气候变化科学的下一个前沿问题:确定冰冻圈的突然、不可逆转和不可避免的变化。

遥感技术可为理解冰冻圈临界变化发挥关键作用。首先,遥感可从空间角度推断临界变化及其因果关系,并识别潜在的临界阈值。随着遥感观测时间序列长度的不断增加,遥感还可从时空模式角度更全面地理解临界变化过程,并监测识别早期预警信号和潜在级联效应(Lenton等,2024)。例如,遥感提供的高空间覆盖数据产品,独立于模拟数据,可用于分析临界要素的多稳态模式。此外,遥感能够监测冰川物质平衡,为流域水资源管理提供早期预警;监测冰盖(如冰流速、冰厚度、接地线等)的动态变化,揭示冰盖的加速融化和不稳定性;监测海冰和积雪,识别两者相互作用和潜在的远程耦合和级联效应。总之,冰冻圈临界变化研究涉及气候、水文、生态和力学等复杂过程,具有极为丰富的研究内容。系统性思维和复杂系统的理论工具是其研究的基础,同时也对遥感产品的准确性、时序长度、分辨率、连续性和一致性等提出了更高要求。

3.4 完善冰冻圈数据产品与服务

冰冻圈遥感数据产品是理解冰冻圈过程与机制、评估冰冻圈变化及影响,从而驱动冰冻圈科学发展的重要基础。随着中国冰冻圈遥感研究的快速发展,各类冰冻圈要素的遥感产品大量涌现(详见第2部分),其中部分产品已经具备国际竞争力,甚至在某些领域发挥了国际引领作用。同时,数据开放程度也不断提高,多个地学相关的国家科学数据中心都具备冰冻圈数据产品的加工、研制和服务能力,尤其是国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>[2025-02-25]),凭借丰富的冰冻圈数据产品、高开放程度和友好的数据服务(Pan等,2021),成为中国冰冻圈研究的数据枢纽,有力支撑了冰冻圈相关研究和应用。但整体来看,目前中国冰冻圈数据产品在要素和区域覆盖上不均衡,应用推广和国际影响力也不足,

相对于冰冻圈科学发展的新要求和国际水平,总体上还存在一定差距。因此,需要进一步加强和完善冰冻圈遥感数据产品研究,打造一系列高质量冰冻圈数据产品,并向全球提供高质量的数据服务。具体而言,根据各类冰冻圈要素的不同进展,可从以下3个方面分类推进。首先是需要重点关注的冰冻圈新要素,如多年冻土地下冰、冰内结构(冰下水流、沉积物等),对这类要素产品的研发,有助于填补相关知识空白。其次,在中国区域已经形成产品生产能力,需要向全球扩展的要素,如热融滑塌、石冰川、岩屑坡、雪深等。第3类要素是已积累了大量数据产品,如积雪面积、热融湖塘、地表冻融、海冰密集度等,需要综合再分析,通过产品算法与精度的系统对比,融合不同产品的优势,制备出更长时间序列、更高质量、时空一致的数据产品。

4 结语

通过文献综述和分析,本文总结了近年来中国冰冻圈遥感研究的发展趋势,并探讨了冰冻圈遥感的潜在突破方向。近年来中国冰冻圈遥感研究进展迅速,在研究区域上,逐渐从中国区域(特别是青藏高原)向全球扩展;关注的要素也从以山地冰川、冻土、积雪为主,逐渐转向涵盖全冰冻圈要素。在遥感数据应用方面,国外、国产卫星融合应用并重,遥感算法的性能整体达到国际先进水平,各类产品井喷式涌现,为全球冰冻圈分布和变化的监测和理解做出了重要贡献。然而,学科发展的新形势和国家发展的实际需求,对冰冻圈遥感的透视能力、智能化水平、临界变化过程的理解水平以及数据产品等方面提出了新要求。

针对上述长期挑战,本文提出以下3个方面的优先行动建议。首先,针对冰冻圈遥感透视能力的挑战,建议开展一次冰冻圈关键要素层析遥感综合试验,全面评估浅层地球物理和遥感方法在复杂冰冻圈内部结构探测方面的应用能力,并发展综合方法,以突破冰冻圈关键要素的直接探测能力。其次,针对冰冻圈遥感数据产品区域与要素覆盖不均衡、国际影响力不足等问题,建议开展冰冻圈遥感数据产品集成研究,从产品已经较为丰富的要素开始,系统检验对比已有产品精度,融合多源观测,打造具有全球影响力的中国冰冻

圈数据产品品牌。对于在国内已经形成优势的产品, 需要快速向全球扩展, 并向全球提供高质量数据服务。最后, 针对冰冻圈遥感智能化和冰冻圈临界变化预测能力的挑战, 建议加强人工智能应用创新, 通过机理—人工智能耦合模型开发、冰冻圈遥感数据同化等研究, 实现更可靠、更高效的冰冻圈遥感识别和变化预测, 从而促进对冰冻圈临界变化的理解, 并为各类应用提供有力的信息和知识服务。总之, 冰冻圈遥感研究已经进入攻坚和融合发展的新阶段, 通过透视能力的攻坚和数据与模型集成整合, 构建冰冻圈数字孪生平台 (Li等, 2023e), 提供智能决策工具、数据、信息和知识服务, 将推动冰冻圈科学的跨越式发展, 服务于灾害、生态、水文和可持续发展等重要国家需求。

参考文献 (References)

- Al-Ibadi M, Sprick J, Athinarapu S, Stumpf T, Paden J, Leuschen C, Rodríguez F, Xu M G, Crandall D, Fox G, Burgess D, Sharp M, Copland L and Van Wychen W. 2017. DEM extraction of the basal topography of the Canadian archipelago ICE caps via 2D automated layer-tracker//Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth: IEEE: 965-968 [DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127114]
- Andersson T R, Hosking J S, Pérez-Ortiz M, Paige B, Elliott A, Russell C, Law S, Jones D C, Wilkinson J, Phillips T, Byrne J, Tietsche S, Sarojini B B, Blanchard-Wrigglesworth E, Aksenov Y, Downie R and Shuckburgh E. 2021. Seasonal Arctic sea ice forecasting with probabilistic deep learning. *Nature Communications*, 12(1): 5124 [DOI: 10.1038/s41467-021-25257-4]
- Arnold E, Leuschen C, Rodriguez-Morales F, Li J L, Paden J, Hale R and Keshmiri S. 2020. CReSIS airborne radars and platforms for ice and snow sounding. *Annals of Glaciology*, 61(81): 58-67 [DOI: 10.1017/aog.2019.37]
- Cai Y, Duguay C R and Ke C Q. 2022. A 41-year (1979-2019) passive-microwave-derived lake ice phenology data record of the northern Hemisphere. *Earth System Science Data*, 14(7): 3329-3347 [DOI: 10.5194/essd-14-3329-2022]
- Cao M S, Li X, Chen X Z, Wang J and Che T. 2006. *Remote Sensing of Cryosphere*. Beijing: Science Press (曹梅盛, 李新, 陈贤章, 王建, 车涛. 2006. 冰冻圈遥感. 北京: 科学出版社)
- Che T, Li X, Li X W and Jiang L M. 2020. Developing cryospheric remote sensing, promoting scientific programme of earth's three poles. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 35(4): 484-493 (车涛, 李新, 李新武, 江利明. 2020. 冰冻圈遥感: 助力“三极”大科学计划. *中国科学院院刊*, 35(4): 484-493) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20200323001]
- Chen K, Dong S B, Li Y X, Xu H X, Xie Z C, Jiang L F, Li E C, Wu Q and Shang J. 2022. Terahertz radiation and scattering characteristics of ice cloud and sounding parameter design. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(11): 2204-2218 (陈柯, 董彬彬, 李迎雪, 徐红新, 谢振超, 姜丽菲, 李恩晨, 吴琼, 商建. 2022. 太赫兹冰云辐射散射特性研究和探测参数设计. *遥感学报*, 26(11): 2204-2218) [DOI: 10.11834/jrs.20220211]
- Chen R H, Tabatabaenejad A and Moghaddam M. 2019. Retrieval of permafrost active layer properties using time-series P-band radar observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(8): 6037-6054 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.29039350]
- Chen S Y, Shokr M, Li X Q, Ye Y F, Zhang Z L, Hui F M and Cheng X. 2020. MYI floes identification based on the texture and shape feature from dual-polarized sentinel-1 imagery. *Remote Sensing*, 12(19): 3221 [DOI: 10.3390/rs12193221]
- Chen S Y, Shokr M, Zhang L, Zhang Z L, Hui F M, Cheng X, Qin P and Murashkin D. 2024. Arctic wintertime sea ice lead detection from sentinel-1 SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4302419 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3444045]
- Cheng G D. 1996. The role of Cryosphere in climate change//Proceedings of the Fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology, Volume 2 (Geocryology). Lanzhou: Gansu Culture Press: 807-817 (程国栋. 1996. 冰冻圈在气候变化中的作用//第五届全国冰川冻土学大会论文集. 兰州: 甘肃文化出版社: 807-817)
- Chu X D, Yao X J, Duan H Y, Chen C, Li J and Pang W L. 2022. Glacier extraction based on high-spatial-resolution remote-sensing images using a deep-learning approach with attention mechanism. *The Cryosphere*, 16(10): 4273-4289 [DOI: 10.5194/tc-16-4273-2022]
- Cui X B, Sun B, Zhang X P, Zhang D, Li X, Tang X Y and Tiao G. 2009. A review of ice radar's technical development in polar ice sheet investigation. *Chinese Journal of Polar Research*, 21(4): 322-335 (崔祥斌, 孙波, 张向培, 张栋, 李鑫, 唐学远, 田钢. 2009. 极地冰盖冰雷达探测技术的发展综述. *极地研究*, 21(4): 322-335)
- Dai L Y, Che T, Xie H J and Wu X J. 2018. Estimation of snow depth over the Qinghai-Tibetan plateau based on AMSR-E and MODIS data. *Remote Sensing*, 10(12): 1989 [DOI: 10.3390/rs10121989]
- Du J Y, Kimball J S, Azarderakhsh M, Dunbar R S, Moghaddam M and McDonald K C. 2014. Classification of Alaska spring thaw characteristics using satellite L-band radar remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(1): 542-556 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2325409]
- Feng T T, Li Y J, Wang K L, Qiao G, Cheng Y, Yuan X H, Luo S L and Li R X. 2023b. A hierarchical network densification approach for reconstruction of historical ice velocity fields in East Antarctica. *Journal of Glaciology*, 69(274): 281-300 [DOI: 10.1017/jog.2022.58]
- Feng T W, Hao X H, Wang J, Luo S Q, Huang G H, Li H Y and Zhao Q. 2023a. Applicability of alpine snow depth estimation based on multitemporal UAV-LiDAR data: a case study in the Maxian Mountains, Northwest China. *Journal of Hydrology*, 617: 129006 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.129006]
- Gao W Q, Hao X H, He D C, Sun X L, Li H Y, Ren H R and Zhao Q. 2024. Machine learning-based mapping of fraction snow cover in High Mountain Asia by MODIS. *National Remote Sensing Bulletin*

- tin, 28(9): 2223-2239 (高伟强, 郝晓华, 和栋材, 孙兴亮, 李弘毅, 任鸿瑞, 赵琴. 2024. MODIS 亚洲高山区积雪面积比例制图. 遥感学报, 28(9): 2223-2239) [DOI: 10.11834/jrs.20242483]
- Guo L, Li J, Dehecq A, Li Z W, Li X and Zhu J J. 2023. A new inventory of High Mountain Asia surging glaciers derived from multiple elevation datasets since the 1970s. *Earth System Science Data*, 15(7): 2841-2861 [DOI: 10.5194/essd-15-2841-2023]
- Hajnsek I, Jagdhuber T, Schon H and Papathanassiou K P. 2009. Potential of estimating soil moisture under vegetation cover by means of PolSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(2): 442-454 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2009642]
- Hao X H, Huang G H, Che T, Ji W Z, Sun X L, Zhao Q, Zhao H Y, Wang J, Li H Y and Yang Q. 2021. The NIEER AVHRR snow cover extent product over China - a long-term daily snow record for regional climate research. *Earth System Science Data*, 13(10): 4711-4726 [DOI: 10.5194/essd-13-4711-2021]
- Hao X H, Huang G H, Zheng Z J, Sun X L, Ji W Z, Zhao H Y, Wang J, Li H Y and Wang X Y. 2022. Development and validation of a new MODIS snow-cover-extent product over China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(8): 1937-1952 [DOI: 10.5194/hess-26-1937-2022]
- He L, Xue B H, Huang S, Hui F M, Chen Z Q and Cheng X. 2022. On the synergy of SMAP and AMSR2 for estimating snow depth on arctic sea ice. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 2001205 [DOI: 10.1109/LGRS.2022.3188001]
- He L, Xue B H, Hui F M and Cheng X. 2023. Triple collocation-based merging of winter snow depth retrievals on arctic sea ice derived from three different algorithms using AMSR2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 4301915 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3290073]
- He L, Xue B H, Hui F M, Xu S M, Chen Z Q and Cheng X. 2024. Toward daily snow depth estimation on arctic sea ice during the whole winter season from passive microwave radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4300615 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3358340]
- Hou J L, Huang C L, Zhang Y and Guo J F. 2020. On the value of available MODIS and Landsat8 OLI image pairs for MODIS fractional snow cover mapping based on an artificial neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(6): 4319-4334 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2963075]
- Hu Y X, Che T, Dai L Y and Xiao L. 2021. Snow depth fusion based on machine learning methods for the northern Hemisphere. *Remote Sensing*, 13(7): 1250 [DOI: 10.3390/rs13071250]
- Hu Z Y, Yan D Z, Feng M, Xu J H, Liang S H and Sheng Y. 2024. Enhancing mountainous permafrost mapping by leveraging a rock glacier inventory in northeastern Tibetan Plateau. *International Journal of Digital Earth*, 17(1): 2304077 [DOI: 10.1080/17538947.2024.2304077]
- Huang A Q, Shen R P, Di W L and Han H M. 2021. A methodology to reconstruct LAI time series data based on generative adversarial network and improved Savitzky-Golay filter. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 105: 102633 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102633]
- Huang Y, Ren Y B and Li X F. 2024. Deep learning techniques for enhanced sea-ice types classification in the Beaufort Sea via SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 308: 114204 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114204]
- Huang Y, Xu J H, Xu J Y, Zhao Y L, Yu B L, Liu H X, Wang S J, Xu W J, Wu J P and Zheng Z J. 2022. HMRFS - TP: long-term daily gap-free snow cover products over the Tibetan Plateau from 2002 to 2021 based on hidden Markov random field model. *Earth System Science Data*, 14(9): 4445-4462 [DOI: 10.5194/essd-14-4445-2022]
- Huang Y, Yang L C and Fu Z T. 2020. Reconstructing coupled time series in climate systems using three kinds of machine-learning methods. *Earth System Dynamics*, 11(3): 835-853 [DOI: 10.5194/esd-11-835-2020]
- Jiang L M, Yang B, Xiao P, Zhou Z W and Wang H S. 2024. Tomographic imaging technology and applications of snow/ice penetrating radar: current status, challenges and prospects. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 46(3): 1069-1086 (江利明, 杨波, 肖鹏, 周志伟, 汪汉胜. 2024. 冰雪探测雷达层析成像技术与应用: 现状、挑战与展望. *冰川冻土*, 46(3): 1069-1086) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2024.0085]
- Jiang L M, Yang J W, Zhang C, Wu S L, Li Z, Dai L Y, Li X F and Qiu Y B. 2022. Daily snow water equivalent product with SMMR, SSM/I and SSMIS from 1980 to 2020 over China. *Big Earth Data*, 6(4): 420-434 [DOI: 10.1080/20964471.2022.2032998]
- Jin H A. 2021. Ice thickness monitoring of Gahai lake based on airborne radar and Sentinel-1 SAR. Lanzhou: Northwest Normal University (靳惠安. 2021. 基于机载测冰雷达与 Sentinel-1 SAR 的尕斯库勒湖冰厚监测. 兰州: 西北师范大学) [DOI: 10.27410/d.cnki.gxbfu.2021.001779]
- Jing Y H, Shen H F, Li X H and Guan X B. 2019. A two-stage fusion framework to generate a spatio-temporally continuous MODIS NDSI product over the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 11(19): 2261 [DOI: 10.3390/rs11192261]
- Jing Y Y, Chen Y C, Ma X C, Ma J L, Li X, Ma N K and Bi K. 2022. Characteristics of summer hailstorms observed by Radar and Himawari-8 in Beijing, China. *Remote Sensing*, 14(22): 5843 [DOI: 10.3390/rs14225843]
- Lenton T M, Abrams J F, Bartsch A, Bathiany S, Boulton C A, Buxton J E, Conversi A, Cunliffe A M, Hebden S, Lavergne T, Poulter B, Shepherd A, Smith T, Swingedouw D, Winkelmann R and Boers N. 2024. Remotely sensing potential climate change tipping points across scales. *Nature Communications*, 15(1): 343 [DOI: 10.1038/s41467-023-44609-w]
- Letu H, Ishimoto H, Riedi J, Nakajima T Y, C.-Labonnote L, Baran A J, Nagao T M and Sekiguchi M. 2016. Investigation of ice particle habits to be used for ice cloud remote sensing for the GCOM-C satellite mission. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(18): 12287-12303 [DOI: 10.5194/acp-16-12287-2016]
- Letu H, Nagao T M, Nakajima T Y, Riedi J, Ishimoto H, Baran A J, Shang H Z, Sekiguchi M and Kikuchi M. 2019. Ice cloud properties from Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite: capability of the AHI to monitor the DC cloud generation process. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(6): 3229-3239 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2882803]
- Li H J, Li H Y, Wang J and Hao X H. 2020a. Monitoring high-altitude river ice distribution at the basin scale in the northeastern Tibetan

- Plateau from a Landsat time-series spanning 1999-2018. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111915 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111915]
- Li H J, Li H Y, Wang J and Hao X H. 2021. Identifying river ice on the Tibetan Plateau based on the relative difference in spectral bands. *Journal of Hydrology*, 601: 126613 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126613]
- Li H L, Ke C Q, Zhu Q H, Li M M and Shen X Y. 2022a. A deep learning approach to retrieve cold-season snow depth over Arctic sea ice from AMSR2 measurements. *Remote Sensing of Environment*, 269: 112840 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112840]
- Li J, Li Z W, Zhong W J, Gu Y Y, Li L, Guo L, Feng J J. 2024. Estimating glacier mass balance in the source region of the Yangtze River during 2000—2020 through InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 53(5): 801-812 (李佳, 李志伟, 钟文杰, 顾云杨, 李龙, 郭磊, 冯娟娟. 2024. 利用InSAR技术估计长江源冰川2000年—2020年物质平衡. *测绘学报*, 53(5): 801-812) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230262]
- Li M, Letu H, Ishimoto H, Li S L, Liu L, Nakajima T Y, Ji D B, Shang H Z and Shi C. 2023a. Retrieval of terahertz ice cloud properties from airborne measurements based on the irregularly shaped Voronoi ice scattering models. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(2): 331-353 [DOI: 10.5194/amt-16-331-2023]
- Li M, Letu H, Peng Y R, Ishimoto H, Lin Y L, Nakajima T Y, Baran A J, Guo Z Y, Lei Y H and Shi J C. 2022b. Investigation of ice cloud modeling capabilities for the irregularly shaped Voronoi ice scattering models in climate simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(7): 4809-4825 [DOI: 10.5194/acp-22-4809-2022]
- Li N, Zhang J, Wang D and Wang P. 2023b. Research on hail mechanism features based on dual-polarization radar data. *Atmosphere*, 14(12): 1827 [DOI: 10.3390/atmos14121827]
- Li R X, Cheng Y, Chang T, Gwyther D E, Forbes M, An L, Xia M L, Yuan X H, Qiao G, Tong X H and Ye W K. 2023c. Satellite record reveals 1960s acceleration of Totten Ice Shelf in East Antarctica. *Nature Communications*, 14(1): 4061 [DOI: 10.1038/s41467-023-39588-x]
- Li R X, He Y Q, Li H W, Gu Y Y, Li G J, Qiao G, Xie H, Hao T and Cui X. 2024a. A new model for elevation change estimation in Antarctica from photon-counting ICESat-2 altimetric data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4301515 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3395522]
- Li R X, Li G J, Hai G, Xie H, Cheng Y, Chen W, Cui X B, Ding M H, Gao C C, Hao T, Ke C Q, Li C J, Li J, Liu Y, Ran J J, Ren J W, Shen Q, Shen Y Z, Shi H L, Wang S Y, Wang Z M, Zhan J G, Zhang B J, Zhong M and Zhou C X. 2024b. Reconciled estimation of Antarctic ice sheet mass balance and contribution to global sea level change from 1996 to 2021. *Science China Earth Sciences*, 67(11): 3562-3578 [DOI: 10.1007/s11430-023-1394-5]
- Li R X, Ye W K, Qiao G, Tong X H, Liu S J, Kong F S and Ma X W. 2017. A new analytical method for estimating antarctic ice flow in the 1960s from historical optical satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(5): 2771-2785 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2654484]
- Li T, Hu Y L, Liu B, Jiang L M, Wang H S and Shen X. 2023d. Co-registration and residual correction of digital elevation models: a comparative study. *The Cryosphere*, 17(12): 5299-5316 [DOI: 10.5194/tc-17-5299-2023]
- Li X, Che T and Li X W. 2020. *Cryosphere Remote Sensing*. Beijing: Science Press (李新, 车涛, 李新武. 2020. 冰冻圈遥感学. 北京: 科学出版社)
- Li X, Che T, Li X W, Wang L, Duan A M, Shangguan D H, Pan X D, Fang M and Bao Q. 2020b. CASEarth poles: big data for the three poles. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(9): E1475-E1491 [DOI: 10.1175/BAMS-D-19-0280.1]
- Li X, Cheng G D, Jin H J, Kang E S, Che T, Jin R, Wu L Z, Nan Z T, Wang J and Shen Y P. 2008. Cryospheric change in China. *Global and Planetary Change*, 62(3-4): 210-218 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2008.02.001]
- Li X, Feng M, Ran Y H, Su Y, Liu F, Huang C L, Shen H F, Xiao Q, Su J B, Yuan S W and Guo H D. 2023e. Big Data in Earth system science and progress towards a digital twin. *Nature Reviews Earth and Environment*, 4(5): 319-332 [DOI: 10.1038/s43017-023-00409-w]
- Li X, Long D, Huang Q and Zhao F Y. 2022d. The state and fate of lake ice thickness in the northern Hemisphere. *Science Bulletin*, 67(5): 537-546 [DOI: 10.1016/j.scib.2021.10.015]
- 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]
- Li X D and Guo Y L. 2025. Paradigm shifts from data-intensive science to robot scientists. *Science Bulletin*, 70(1): 14-18 [DOI: 10.1016/j.scib.2024.09.029]
- Li X H, Wang L Y, Cheng Q, Wu P H, Gan W X and Fang L N. 2019. Cloud removal in remote sensing images using nonnegative matrix factorization and error correction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 148: 103-113 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.12.013]
- Lin Y C, Nakayama Y, Liang K X, Huang Y T, Chen D K and Yang Q H. 2024. A dataset of the daily edge of each polynya in the Antarctic. *Scientific Data*, 11(1): 1006 [DOI: 10.1038/s41597-024-03848-2]
- Liu H, Ji H L, Mou X Y, Gao G M and Zhang B S. 2020. Experimental study on Yellow River ice thickness monitoring test based on UAV Radar technology. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 18(3): 217-224 (刘辉, 冀鸿兰, 牟献友, 郜国明, 张宝森. 2020. 基于无人机载雷达技术的黄河冰厚监测试验. *南水北调与水利科技(中英文)*, 18(3): 217-224) [DOI: 10.13476/j.cnki.nsbjzk.2020.0067]
- Liu L, Jiang L M, Jiang H J, Wang H S, Ma N and Xu H Z. 2019. Accelerated glacier mass loss (2011-2016) over the Puruogangri ice field in the Inner Tibetan Plateau revealed by bistatic InSAR measurements. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111241 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111241]
- Liu L, Zhang Z M, Sun Y L, Shi X G and Jiang L M. 2024. Annual mass-balance time series of Dongkemadi Glacier, 2000-20, from a linear albedo-based model using geodetic data and validated with the glaciological method. *Journal of Glaciology*, 70: e87

- [DOI: 10.1017/jog.2024.1]
- Liu X C, An L, Hai G, Xie H and Li R X. 2023a. Updating glacier inventories on the periphery of Antarctica and Greenland using multi-source data. *Annals of Glaciology*, 64(92): 352-369 [DOI: 10.1017/aog.2023.75]
- Liu Y B, Ran Y H, Li X, Che T and Wu T H. 2023b. Multisite evaluation of physics-informed deep learning for permafrost prediction in the Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 216: 104009 [DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.104009]
- Lu Y J, Zhang Z, Shangguan D H and Yang J H. 2021. Novel machine learning method integrating ensemble learning and deep learning for mapping debris-covered glaciers. *Remote Sensing*, 13(13): 2595 [DOI: 10.3390/rs13132595]
- Luo J, Niu F J, Lin Z J, Liu M H, Yin G A and Gao Z Y. 2022. Inventory and frequency of retrogressive thaw slumps in permafrost region of the Qinghai - Tibet Plateau. *Geophysical Research Letters*, 49(23): e2022GL099829 [DOI: 10.1029/2022GL099829]
- McKay D I A, Staal A, Abrams J F, Winkelmann R, Sakschewski B, Loriani S, Fetzer I, Cornell S E, Rockström J and Lenton T M. 2022. Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611): eabn7950 [DOI: 10.1126/science.abn7950]
- Pan F B, Jiang L M, Wang G X, Pan J M, Huang J Y, Zhang C, Cui H Z, Yang J W, Zheng Z J, Wu S L and Shi J C. 2024. MODIS daily cloud-gap-filled fractional snow cover dataset of the Asian Water Tower region (2000-2022). *Earth System Science Data*, 16(5): 2501-2523 [DOI: 10.5194/essd-16-2501-2024]
- Pan X D, Guo X J, Li X, Niu X L, Yang X J, Feng M, Che T, Jin R, Ran Y H and Guo J W, Hu X L and Wu A D. 2021. National Tibetan Plateau Data Center: promoting earth system science on the third pole. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(11): E2062-E2078 [DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0004.1]
- Philipp M, Dietz A, Ullmann T and Kuenzer C. 2022. Automated extraction of annual erosion rates for Arctic permafrost coasts using Sentinel-1, deep learning, and change vector analysis. *Remote Sensing*, 14(15): 3656 [DOI: 10.3390/rs14153656]
- Qi M Z, Liu Y, Liu J P, Cheng X, Lin Y J, Feng Q Y, Shen Q and Yu Z T. 2021. A 15-year circum-Antarctic iceberg calving dataset derived from continuous satellite observations. *Earth System Science Data*, 13(9): 4583-4601 [DOI: 10.5194/essd-13-4583-2021]
- Qiao H W, Zhang P, Li Z, Huang L, Zhao C J, Gao S, Liu C, Wu Z P, Liang S, Zhou J M, Sun W and Wang L F. 2023. Snow profile reconstruction from tomographic UAV SAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118: 103291 [DOI: 10.1016/j.jag.2023.103291]
- Qin D H. 2014. *Glossary of Cryosphere Science*. Beijing: China Meteorological Press (秦大河. 2014. 冰冻圈科学辞典. 北京: 气象出版社)
- Qin D H, Yao T D, Ding Y J and Ren J W. 2020. Establishment and significance of the scientific system of cryospheric science. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 35(4): 393-406 (秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 任贾文. 2020. 冰冻圈科学体系的建立及其意义. 中国科学院院刊, 35(4): 393-406) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20200331001]
- Qiu Y B, Xie P F, Leppäranta M, Wang X X, Lemmetyinen J, Lin H and Shi L. 2019. MODIS-based daily lake ice extent and coverage dataset for Tibetan Plateau. *Big Earth Data*, 3(2): 170-185 [DOI: 10.1080/20964471.2019.1631729]
- Qiu Y J, Li X M and Guo H D. 2023. Spaceborne thermal infrared observations of Arctic sea ice leads at 30 m resolution. *The Cryosphere*, 17(7): 2829-2849 [DOI: 10.5194/tc-17-2829-2023]
- Qu M, Pang X P, Zhao X, Lei R B, Ji Q, Liu Y and Chen Y. 2021. Spring leads in the Beaufort Sea and its interannual trend using Terra/MODIS thermal imagery. *Remote Sensing of Environment*, 256: 112342 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112342]
- Rajat S, Singh B R, Prakash C and Anita S. 2022. Glacier retreat in Himachal from 1994 to 2021 using deep learning. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28: 100870 [DOI: 10.1016/j.rsase.2022.100870]
- Ran J J, Ditmar P, van den Broeke M R, Liu L, Klees R, Khan S A, Moon T, Li J C, Bevis M, Zhong M, Fettweis X, Liu J G, Noël B, Shum C K, Chen J L, Jiang L M and van Dam T. 2024. Vertical bedrock shifts reveal summer water storage in Greenland ice sheet. *Nature*, 635(8037): 108-113 [DOI: 10.1038/s41586-024-08096-3]
- Ran Y H, Li X, Cheng G D, Nan Z T, Che J X, Sheng Y, Wu Q B, Jin H J, Luo D L, Tang Z G and Wu X B. 2021. Mapping the permafrost stability on the Tibetan Plateau for 2005-2015. *Science China Earth Sciences*, 64(1): 62-79 [DOI: 10.1007/s11430-020-9685-3]
- Rodriguez-Morales F, Gogineni S, Leuschen C J, Paden J D, Li J L, Lewis C C, Panzer B, Alvestegui D G G, Patel A, Byers K, Crowe R, Player K, Hale R D, Arnold E J, Smith L, Gifford C M, Braaten D and Panton C. 2014. Advanced multifrequency radar instrumentation for polar research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5): 2824-2842 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2266415]
- Ruan Y, Feng J Q, Li T T and Chen Q P. 2023. Analysis of three-dimensional lightning of hail and short-term heavy rainfall in Fujian Province from 2017 to 2020. *Journal of Meteorology and Environment*, 39(4): 147-154 (阮悦, 冯晋勤, 李婷婷, 陈秋萍. 2023. 2017年—2020年福建省冰雹和短时强降雨云三维闪电特征分析. 气象与环境学报, 39(4): 147-154) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2023.04.018]
- Shang H Z, Letu H, Chen L F, Riedi J, Ma R, Wei L S, Labonnote L C, Hioki S, Liu C, Wang Z T and Wang J J. 2020. Cloud thermodynamic phase detection using a directional polarimetric camera (DPC). *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 253: 107179 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.107179]
- Shen Q, Wang H S, Shum C K, Jiang L M, Hsu H, Gao F and Zhao Y L. 2021. Antarctic-wide annual ice flow maps from Landsat 8 imagery between 2013 and 2019. *International Journal of Digital Earth*, 14(5): 597-618 [DOI: 10.1080/17538947.2020.1862317]
- Shi L J, Liu S, Shi Y N, Ao X, Zou B and Wang Q M. 2021. Sea ice concentration products over polar regions with Chinese FY3C/MWRI data. *Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2174 [DOI: 10.3390/rs13112174]
- Shi Y and Cheng G. 1991. Cryosphere and global change. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, (4): 287-291 (施雅风, 程国栋. 1991. 冰冻圈与全球变化. 中国科学院院刊, (4): 287-291) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.1991.04.002]

- Shi Y L, Che T, Bao J W, Wang X W, Liu G X, Bie Q, He Y, Wu R Z and Feng D D. 2024a. Glacial lakes control ice flow: new insights from satellite SAR PO-SBAS observations in Duiyu Glacier, southern Tibetan Plateau. *International Journal of Digital Earth*, 17(1): 2365964 [DOI: 10.1080/17538947.2024.2365964]
- Shi Z Y, Wang Z M, Zhang B J, Geng H, An J C, Wu S, Liu M L, Wu Y S and Wu H J. 2024b. Bridging the spatiotemporal ice sheet mass change data gap between GRACE and GRACE-FO in Greenland using machine learning method. *Journal of Hydrology*, 629: 130622 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130622]
- Song C T, Zhu J and Li X C. 2024. Assessments of data-driven deep learning models on one-month predictions of pan-arctic sea ice thickness. *Advances in Atmospheric Sciences*, 41(7): 1379-1390 [DOI: 10.1007/s00376-023-3259-3]
- Sun X L, Hao X H, Wang J, Zhao H Y and Ji W Z. 2022. Research on retrieval of MODIS fraction snow cover based on spectral environmental random forest regression model. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 44(1): 147-158 (孙兴亮, 郝晓华, 王建, 赵宏宇, 纪文政. 2022. 基于光谱—环境随机森林回归模型的MODIS积雪面积比例反演研究. *冰川冻土*, 44(1): 147-158) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0026]
- Sun Z Y, Hu Y, Racoviteanu A, Liu L, Harrison S, Wang X W, Cai J X, Guo X, He Y J and Yuan H L. 2024. TPRoGI: a comprehensive rock glacier inventory for the Tibetan Plateau using deep learning. *Earth System Science Data*, 16(12): 5703-5721 [DOI: 10.5194/essd-16-5703-2024]
- Tabatabaenejad A, Burgin M, Duan X Y and Moghaddam M. 2015. P-band radar retrieval of subsurface soil moisture profile as a second-order polynomial: first AirMOSS results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(2): 645-658 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2326839]
- Tebaldini S and Ferro-Famil L. 2013. High resolution three-dimensional imaging of a snowpack from ground-based SAR data acquired at X and Ku band//Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS. Melbourne: IEEE: 77-80 [DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6721096]
- Tebaldini S, Nagler T, Rott H and Heilig A. 2016. Imaging the internal structure of an alpine glacier via L-band airborne SAR tomography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(12): 7197-7209 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2597361]
- Tong J, Gao Y N, Zhan P F and Song C Q. 2024. Advances in lake ice monitoring methods based on remote sensing technology. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(3): 541-557 (童洁, 高永年, 詹鹏飞, 宋春桥. 2024. 湖冰遥感研究进展. *遥感学报*, 28(3): 541-557) [DOI: 10.11834/jrs.20232447]
- Tong J, Lin Y L, Fan C Y, Liu K, Chen T, Zeng F X, Zhan P F, Ke L H, Gao Y N and Song C Q. 2024. Fine-scale monitoring of lake ice phenology by synthesizing remote sensed and climatologic features based on high-resolution satellite constellation and modeling. *Science of the Total Environment*, 912: 169002 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169002]
- Vaaja M and Hallikainen M. 2013. Remote sensing of frozen soil at UHF frequencies//Proceedings of the XXXIII Finnish URSI Convention on Radio Science and SMARAD Seminar 2013. Espoo, Finland: Aalto ARTS Books: 201-203
- Wang C, Yang N, Zhao T J, Xue H Z, Peng Z Q, Zheng J Y, Pan J M, Yao P P, Gao X W, Yan H B, Song P L, Liou Y A and Shi J C. 2024a. All-season liquid soil moisture retrieval from SMAP. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 8258-8270 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3382315]
- Wang J, Che T, Dai L Y, Yue S N and Zheng Z J. 2023. Spatio-temporal comparison of snow depth between passive microwave remote sensing inversion data and meteorological station observation data. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(9): 2060-2071 (王静, 车涛, 戴礼云, 岳珊珊, 郑照军. 2023. 被动微波遥感反演雪深与气象站观测雪深时空对比. *遥感学报*, 27(9): 2060-2071) [DOI: 10.11834/jrs.20221653]
- Wang K, Wu Y, Qiu X L, Zhu J B, Zheng D H, Shangguan S T, Pan J, Liu Y Q, Jiang L M and Li X. 2025. A novel airborne TomoSAR 3-D focusing method for accurate ice thickness and glacier volume estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 220: 593-607 [DOI: 10.1016/j.isprs.2025.01.011]
- Wang L X, Zhao L, Zhou H Y, Liu S B, Hu G J, Li Z B, Wang C and Zhao J T. 2023a. Evidence of ground ice melting detected by InSAR and in situ monitoring over permafrost terrain on the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Permafrost and Periglacial Processes*, 34(1): 52-67 [DOI: 10.1002/ppp.2171]
- Wang L X, Zhao L, Zhou H Y, Liu S B, Liu G Y, Zou D F, Du E J, Hu G J and Wang C. 2023b. Quantification of Water Released by Thawing Permafrost in the Source Region of the Yangtze river on the Tibetan plateau by InSAR monitoring. *Water Resources Research*, 59(12): e2023WR034451 [DOI: 10.1029/2023WR034451]
- Wang Q M, Shokr M, Chen S Y, Zheng Z J, Cheng X and Hui F M. 2022a. Winter sea-ice lead detection in arctic using FY-3D MERIS-II data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 7005105 [DOI: 10.1109/LGRS.2022.3223689]
- Wang Q Y, Yi S and Sun W K. 2021a. Continuous estimates of glacier mass balance in high mountain asia based on ICESat-1, 2 and GRACE/GRACE follow-on data. *Geophysical Research Letters*, 48(2): e2020GL090954 [DOI: 10.1029/2020GL090954]
- Wang X, Chen Z Q, Fang Y, Wang R R, Li C Y, Li G, Hui F M, Huang H B and Cheng X. 2023c. An improvement in accuracy and spatial resolution of the pattern-matching sea ice drift from SAR imagery. *International Journal of Digital Earth*, 16(2): 4073-4094 [DOI: 10.1080/17538947.2023.2264918]
- Wang X, Chen Z Q, Xu Z Z, Wang R R, Lu R, Fang Y, Hui F M and Cheng X. 2024b. A framework for fine-resolution and spatially continuous arctic sea ice drift retrieval using multisensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4301418 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3394882]
- Wang X C, Feng L, Gibson L, Qi W, Liu J G, Zheng Y, Tang J, Zeng Z Z and Zheng C M. 2021b. High-resolution mapping of ice cover changes in over 33,000 lakes across the North Temperate Zone. *Geophysical Research Letters*, 48(12): e2021GL095614 [DOI: 10.1029/2021GL095614]
- Wang X X, Qiu Y B, Zhang Y X, Lemmetyinen J, Cheng B, Liang W S and Leppäranta M. 2022b. A lake ice phenology dataset for the northern Hemisphere based on passive microwave remote sens-

- ing. *Big Earth Data*, 6(4): 401-419 [DOI: 10.1080/20964471.2021.1992916]
- Wang X Y, Wang J, Che T, Huang X D, Hao X H and Li H Y. 2018. Snow cover mapping for complex mountainous forested environments based on a multi-index technique. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(5): 1433-1441 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2810094]
- Wang Y R. and Li X M. 2021. Arctic sea ice cover data from spaceborne synthetic aperture radar by deep learning. *Earth System Science Data*, 13(6): 2723-2742 [DOI: 10.5194/essd-13-2723-2021]
- Wang Y Y, Ma J J, Li J H, Hong J and Li Z Q. 2022. Review of cloud polarimetric remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(5): 852-872 (王宇瑶, 麻金继, 李婧晗, 洪津, 李正强. 2022. 云偏振遥感综述. *遥感学报*, 26(5): 852-872) [DOI: 10.11834/jrs.20221404]
- Xia Z X, Liu L, Mu C C, Peng X Q, Zhao Z Y, Huang L C, Luo J and Fan C Y. 2024. Widespread and rapid activities of retrogressive thaw slumps on the Qinghai-Tibet plateau from 2016 to 2022. *Geophysical Research Letters*, 51(17): e2024GL109616 [DOI: 10.1029/2024GL109616]
- Xiao F, Zhang S K, Li J X, Geng T, Xuan Y and Li F. 2021. Arctic sea ice thickness variations from CryoSat-2 satellite altimetry data. *Science China Earth Sciences*, 64(7): 1080-1089 [DOI: 10.1007/s11430-020-9777-9]
- Xie F M, Liu S Y, Gao Y P, Zhu Y, Bolch T, Kääb A, Duan S M, Miao W F, Kang J, Zhang Y N, Pan X R, Qin C X, Wu K P, Qi M M, Zhang X H, Yi Y, Han F Z, Yao X J, Liu Q, Wang X, Jiang Z L, Shanguan D H, Zhang Y, Grünwald R, Adnan M, Karki J and Saifullah M. 2023. Interdecadal glacier inventories in the Karakoram since the 1990s. *Earth System Science Data*, 15(2): 847-867 [DOI: 10.5194/essd-15-847-2023]
- Xu G J, Dou T F, Yang Y F, Yue H D, Letu H S, Ma L J and Xiao C D. 2022. The total mass and spatio-temporal structure of the aerial cryosphere. *Chinese Science Bulletin*, 67(34): 4130-4139 (许高洁, 窦挺峰, 杨一帆, 岳瀚栋, 胡斯勒图, 马丽娟, 效存德. 2022. 大气冰冻圈总量与时空结构. *科学通报*, 67(34): 4130-4139) [DOI: 10.1360/TB-2022-0184]
- Xu X H, Yu X, Liu G H, Yue Z G and Zhu Y N. 2022. Early identification and automatic warning of hail clouds by satellite. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 46(1): 98-110 (徐小红, 余兴, 刘贵华, 岳治国, 朱延年. 2022. 冰雹云卫星早期识别与自动预警. *大气科学*, 46(1): 98-110) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2104.21010]
- Xu Y C, Long D, Li X D, Wang Y M, Zhao F Y and Cui Y H. 2024. Unveiling lake ice phenology in Central Asia under climate change with MODIS data and a two-step classification approach. *Remote Sensing of Environment*, 301: 113955 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113955]
- Ye Y F, Wang X, Sun S Z, Liu Q, Li X Q, Cheng X and Chen Z Q. 2024. A new sea ice concentration retrieval algorithm from thermal infrared imagery. *International Journal of Digital Earth*, 17(1): 2353116 [DOI: 10.1080/17538947.2024.2353116]
- Yue S N, Dai L Y, Deng J, Hu Y X, Xiao L and Che T. 2024. A novel approach for snow depth retrieval in forested areas by integrating horizontal and vertical canopy structures information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 135: 104278 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.104278]
- Zhai X C, Tian S R, Ye Y F, Cao G Z, Chen L, Xu N and Zheng Z J. 2024. First results of antarctic sea ice classification using spaceborne dual-frequency scatterometer FY-3E WindRAD. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 21: 2000105 [DOI: 10.1109/LGRS.2023.3339720]
- Zhang D H, Zhou G, Li W, Zhang S Q, Yao X J and Wei S M. 2022a. A new global dataset of mountain glacier centerlines and lengths. *Earth System Science Data*, 14(9): 3889-3913 [DOI: 10.5194/essd-14-3889-2022]
- Zhang G Q, Bolch T, Yao T D, Rounce D R, Chen W F, Veh G, King O, Allen S K, Wang M M and Wang W C. 2023a. Underestimated mass loss from lake-terminating glaciers in the greater Himalaya. *Nature Geoscience*, 16(4): 333-338 [DOI: 10.1038/s41561-023-01150-1]
- Zhang W S, Yang K, Smith L C, Wang Y H, van As D, Noël B, Lu Y and Liu J Y. 2023b. Pan-Greenland mapping of supraglacial rivers, lakes, and water-filled crevasses in a cool summer (2018) and a warm summer (2019). *Remote Sensing of Environment*, 297: 113781 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113781]
- Zhang Y X, Qiu Y B, Li Y, Leppäranta M, Jia G Q, Jiang Z X and Liang W S. 2024a. Spatial-temporal variation of river ice coverage in the Yenisei river from 2002 to 2021. *Journal of Hydrology*, 637: 131440 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131440]
- Zhang Z D, Li X, Zhou C D, Zhao Y H, Zhao G and Tang Q H. 2024b. Linking ground ice and glacier melting to lake volume change in the Dogai Coring watershed on the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 629: 130581 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130581]
- Zhang Z L, Yu Y N, Shokr M, Li X Q, Ye Y F, Cheng X, Chen Z Q and Hui F M. 2022b. Intercomparison of arctic sea ice backscatter and ice type classification using Ku-band and C-band scatterometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4301718 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3099835]
- Zhao F Y, Long D, Li X D, Huang Q and Han P F. 2022a. Rapid glacier mass loss in the southeastern Tibetan Plateau since the year 2000 from satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, 270: 112853 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112853]
- Zhao H Y, Hao X H, Wang J, Li H Y, Huang G H, Shao D H, Su B, Lei H J and Hu X J. 2020. The spatial - spectral - environmental extraction endmember algorithm and application in the MODIS fractional snow cover retrieval. *Remote Sensing*, 12(22): 3693 [DOI: 10.3390/rs12223693]
- Zhao T J, Shi J C, Hu T X, Zhao L, Zou D F, Wang T X, Ji D B, Li R and Wang P K. 2017. Estimation of high-resolution near-surface freeze/thaw state by the integration of microwave and thermal infrared remote sensing data on the Tibetan Plateau. *Earth and Space Science*, 4(8): 472-484 [DOI: 10.1002/2017EA000277]
- Zhao X, Chen Y, Kern S, Qu M, Ji Q, Fan P and Liu Y. 2022b. Sea ice concentration derived from FY-3D MWRI and its accuracy assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4300418 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3063272]
- Zhou Y S and Duan M. 2024. A batch postprocessing method based on an adaptive data partitioning strategy for DEM differencing from global data products. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Let-*

ters, 21: 2000705 [DOI: 10.1109/LGRS.2024.3365067]
 Zhou Y S, Li X, Zheng D H, Ren S S, Wang Y Z and Li Z W. 2024.
 Data, methods and perspectives of optical stereo and bistatic SAR
 satellites for monitoring glacier thickness change in high-moun-
 tain Asia. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 53(5): 779-
 800 (周玉杉, 李新, 郑东海, 任姗姗, 汪赢政, 李志伟. 2024. 亚洲
 高山区冰川厚度变化光学立体和双基 SAR 卫星监测数据、方法

与展望. *测绘学报*, 53(5): 779-800 [DOI: 10.11947/j.AGCS.
 2024.20230260]

Zhou Y S, Li Z W, Li J, Zhao R and Ding X L. 2018. Glacier mass bal-
 ance in the Qinghai – Tibet Plateau and its surroundings from the
 mid-1970s to 2000 based on Hexagon KH-9 and SRTM DEMs.
Remote Sensing of Environment, 210: 96-112 [DOI: 10.1016/j.
 rse.2018.03.020]

Recent progress and emerging frontiers in China's cryosphere remote sensing research

RAN Youhua^{1,3}, LI Xin^{2,3}, CHE Tao^{1,3}, FENG Min^{2,3}, ZHU Jinbiao^{3,4}, ZHOU Yushan⁵,
 HUI Fengming⁶, QIU Yubao^{3,4}, DOU Tingfeng³, LI Yizhan⁷, ZHENG Donghai^{2,3}, JIN Rui^{1,3}

1. Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, State Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. National Tibetan Plateau Data Center, State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
5. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
6. School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China;
7. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: This paper summarizes the major developments in cryosphere remote sensing research in China in recent years. With advancements in domestic remote sensing technology and the deepening of international cooperation, the breadth and depth of China's cryosphere remote sensing research have continuously expanded. In terms of study areas, the focus has gradually extended from China (particularly the Qinghai-Tibet Plateau) to the Arctic, Antarctic regions and the global cryospheric regions. Regarding remote sensing data applications, reliance on foreign satellite data has transitioned into the joint use of both domestic (e.g., Gaofen, Fengyun satellites) and foreign remote sensing data. In algorithm development, traditional approaches—previously reliant on single data sources with limited automation—have evolved into advanced methodologies featuring multi-source data fusion and intelligent processing. The continuous emergence of various cryosphere remote sensing products has significantly contributed to monitoring and understanding global cryospheric changes. This paper also explores key frontier issues and potential breakthroughs in cryosphere remote sensing, including penetration capabilities, the development of intelligent algorithms, the detection of critical transitions, and advancements in cryosphere data products. Specifically, we discuss the progress and challenges of sensors such as ice-penetrating radar, glacier tomography radar, and active-passive microwave instruments for freeze – thaw cycle detection. It also outlines key directions for advancing intelligent algorithms, including label-free intelligent recognition of cryospheric targets, dual-driven simulations of cryospheric changes that integrate physical mechanisms and data, and autonomous AI-based analysis of cryospheric processes. Furthermore, the paper highlights the critical role of remote sensing in capturing cryospheric critical transitions from both spatial and temporal perspectives and proposes pathways for improving cryosphere data products and services. To further advance cryosphere remote sensing science, this paper proposes three key action initiatives for the near future. First, conducting a comprehensive tomographic remote sensing experiment focused on key cryospheric elements, including glaciers, snow cover, and shallow permafrost. This initiative aims to comprehensively assess the capability of shallow geophysical and remote sensing methods in detecting the complex internal structure of the cryosphere, develop integrated approaches, and achieve breakthroughs in directly detecting key cryospheric elements. Second, integrating cryospheric remote sensing data products. By systematically assessing the accuracy of existing data products—starting with those already relatively abundant—this initiative seeks to enhance multi-source data integration and establish internationally recognized, China-branded products. Last, advancing AI applications in the cryosphere. This initiative promotes innovation in artificial intelligence applications for cryospheric studies, including the development of coupled physical-AI models, cryospheric remote sensing data assimilation, and other research efforts to enhance the reliability and efficiency of remote sensing identification and change prediction. Collectively, these efforts will support the development of a digital twin of the cryosphere and contribute to climate adaptation and mitigation, disaster prevention, ecological conservation, water resource management, and sustainable development.

Key words: snow cover, permafrost, glacier and ice sheet, river, lake, and sea ice, atmospheric cryosphere, penetrative remote sensing, artificial intelligence, critical transition, data products

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFF0729100)