

盐湖区域的微波和光学卫星遥感研究进展

尹媻(1); Hervé YESOU(2);洪文(3); Carlos LÓPEZ-MARTÍNEZ(4);马飞(1);

Danae FELDIS(2);董法彬(3);赵祎烁(3);张奕波(1);黄铭瀚(1);刘一(1)

单位: 1:北京化工大学, 北京, 中国;

2:斯特拉斯堡大学, ICube-SERTIT, 法国;

3:中国科学院空天信息创新研究院, 北京, 中国;

4:加泰罗尼亚理工大学, 西班牙

项目组围绕盐湖区域, 基于 GF-3、Sentinel-1、Sentinel-2、EnMAP、PRISMAS、WOT 和 ICESat-2 等多源遥感数据, 系统开展了盐壳分类、区域制图、盐田识别、沉积物监测及水深反演等研究工作, 进一步拓展了微波遥感、光学遥感与激光测高技术盐湖资源调查、开发管理和动态监测中的应用范围。

在 SAR 研究方面, 主要围绕察尔汗盐湖盐壳类型识别问题展开。察尔汗盐湖不同类型盐壳其极化散射响应相近, 且高分辨率 SAR 影像容易受到相干斑噪声影响, 从而增加了精细分类的难度。针对这一问题, 相关研究分别利用全极化 GF-3 数据和双极化 Sentinel-1 数据, 提出了结合邻域信息的自编码特征优化与重构方法, 对原始极化特征进行压缩、重构与筛选。实验结果表明, 该方法在降低特征冗余的同时增强了特征表达能力, 有效缓解了噪声干扰带来的不利影响, 较好地实现了多种盐壳类型的空间分布提取, 也为后续盐壳表层结构参数提取和地表变化监测提供了基础。

在光学数据方面, 尽管 Sentinel-2 可借助稳健的光谱指数(如 NDWI、NDSI 和 SI) 实现连续的季节性监测, 但其仅有 13 个波段, 限制了对矿物组成的精细判别能力。高光谱传感器——PRISMA (400 - 2500nm) 和 EnMAP (200 余个波段) ——则能够有效弥补这一不足。这两种传感器都可以探测石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 在 1900nm 和 2200nm 处的诊断性吸收特征, 从而能够在蒸发盐壳尚未在宽波段影像中明显显现之前对其进行识别。在察尔汗地区, EnMAP 还揭示了 2300 - 2350nm 附近与碳酸钠类矿物相一致的光谱特征, 而 PRISMA 则探测到了 1300 - 1500nm 范围内一个可能与水合光卤石有关的特征峰, 这类矿物尺度的识别是常规多光谱影像无法实现的。

在所有研究区域中, 对高光谱数据进行主成分分析后均表明, 水分含量是最主要的控制因素 ($\text{PC1} > 70 - 80\%$), 其次为盐晶体性质、嗜盐生物量以及沉积物组成。在察尔汗春季蒸发周期中, 还识别出了可通过 600 - 700nm 窄波段光谱峰探测的杜氏盐藻 (*Dunaliellasalina*)。此外, NDSI-1 与 NDSI-2 之间具有明显互补性: 前者在水体条件下容易快速饱和, 而后者则能够更精细地区分湿度梯度, 这种互补关系只有在高光谱分辨率条件下才能得到充分利用。总体而言, 结果表明, 将 Sentinel-2 用于时间连续观测、将 PRISMA/EnMAP 用于矿物学精细识别, 是当前开展盐环境天地一体化业务监测最稳健方法框架。

在 SAR 与光学遥感融合研究方面, 主要包括察尔汗盐湖区域地物精细制图和全国尺度盐田识别两部分内容。首先, 在察尔汗盐湖区域制图方面, 针对察尔汗盐湖复杂地表类型中盐壳与多种水体难以同时准确区分的问题, 研究结合 Sentinel-1 双极化 SAR 数据与 Sentinel-2 光学影像, 提出了融合各向异性参数 A 和归一化差异水体指数 NDWI 的各向异性水体指数

AWRI。该特征兼顾了极化信息对盐壳的表征能力和光谱信息对水体的识别能力，增强了不同类型地物之间的可分性，实现了较大范围的精细化制图，较好地提升了区域制图的完整性和时效性。

在更大空间尺度上，相关研究面向全国盐田分布测绘问题，提出了融合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 数据的多模态自监督学习框架 SaltMoMAE。该方法通过构建大规模多模态数据集，并结合掩膜重构与对比学习机制，学习不同区域和不同传感器之间具有良好迁移能力的特征表示。在此基础上，对下游盐田分割任务进行微调，最终生成了 2020-2022 年中国 10 米分辨率的全国盐田分布图。结果表明，该方法在全国尺度上具有较高的识别精度，特别是在盐田与相似水域的地物类型之间表现出较强的区分能力。该研究不仅拓展了盐湖遥感研究从区域走向全国的应用尺度，也为我国盐田资源的统一监测和动态更新提供了新思路。

在光学与激光测高融合研究方面，重点开展了盐田沉积物的动态监测，针对察尔汗盐湖人工钠盐池沉积物逐年累积、影响池体有效蓄水能力和生产效率的问题，研究利用 ICESat-2 数据与 Sentinel-2 影像，开展了 2020-2025 年沉积物表面高程及厚度变化的多年观测。通过对光子信号进行去噪、分类和折射校正，并结合光学影像提取的水面高程信息，实现了池塘尺度沉积物表面高程反演。初步结果表明，在水体透明度较好、光学条件较优的情况下，ICESat-2 能够较稳定地反映沉积物逐年累积的变化趋势。该研究验证了激光测高技术人工浅水盐池监测中的可行性，为沉积物清理时机判断和生产调度提供了定量依据。

而针对达布逊湖，研究提出了结合 Sentinel-2 与 SWOT 数据开展湖底地形重建和光谱水深反演的技术框架。该方法利用多时相 Sentinel-2 影像提取湖岸线信息，并结合 SWOT 水面高程数据建立多时相岸线高程约束，进而重建湖底高程模型。在此基础上，根据不同时间的水面高程与湖底高程差值生成训练样本，再结合光学特征训练水深反演模型，实现由光学影像直接获取达布逊湖水深空间分布的目标。同时，研究还引入 ICESat-2 ATL03 光子数据对湖底高程模型进行了精度验证，结果表明该方法在可验证区域内能够取得较好的精度，为缺少大范围实测水深条件下的盐湖水深反演提供了可靠路径。

总体而言，目前研究在去年的基础上进一步加强了多源遥感数据在盐湖区域典型地物分类、参数反演与动态监测的应用。后续计划将进一步研究基于极化 SAR 的盐壳粗糙度与含水量反演，以及基于光学遥感和激光雷达的水量估计与盐田区域含盐量估算等，从而基于多源遥感数据进一步提升盐湖资源参数的反演精度与定量监测能力。