

doi: 10.6046/zrzyyg.2023177

引用格式: 朱雨欣, 满梦甜, 王裕涵, 等. 基于 PlanetScope 光学小卫星与 ICESat-2 激光测高数据的极地冰盖冰面湖水深遥感反演[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 314-320. (Zhu Y X, Man M T, Wang Y H, et al. Remote sensing-based bathymetry retrieval of supraglacial lakes on polar ice sheets using images from small optical satellite PlanetScope and ICESat-2 laser altimetry data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 314-320.)

基于 PlanetScope 光学小卫星与 ICESat-2 激光测高数据的极地冰盖冰面湖水深遥感反演

朱雨欣^{1,2,3}, 满梦甜^{1,2,3}, 王裕涵^{1,2,3}, 陈定华^{1,2,3}, 杨康^{1,2,3}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023; 3. 中国南海研究协同创新中心, 南京 210023)

摘要: 每年消融期, 冰面湖广泛分布于极地冰盖表面, 能够存储大量冰面融水, 但部分冰面湖底部破裂后会输送融水进入冰盖底部, 从而影响冰盖运动与稳定性。因此, 准确测算冰面湖水深信息, 进而估算冰面湖体积及其动态变化, 对于理解极地冰盖水文过程具有重要意义。然而, 实地测量冰面湖深度难度大、成本高、覆盖范围小, 通过中低空间分辨率光学遥感影像构建的冰面湖水深反演模型精度不足。该研究综合 PlanetScope SuperDove 光学小卫星 8 波段遥感影像(空间分辨率为 3 m)与 ICESat-2 激光测高数据反演冰面湖水深。首先, 通过自适应核密度估计分离并拟合湖面与湖底 ICESat-2 激光测高点云, 进而获取冰面湖水深观测结果; 其次, 利用最佳波段比值分析 PlanetScope 影像不同波段(组合)与 ICESat-2 水深数据的相关关系, 构建二次函数、指数函数、幂函数与对数函数 4 种冰面湖水深反演经验公式; 最后, 选择 4 个具有同时期 PlanetScope 和 ICESat-2 数据覆盖的冰面湖, 测试冰面湖水深遥感反演的精度。结果表明 PlanetScope 绿光 1 波段是冰面湖水深反演最佳波段, 单波段反射率与冰面湖水深相关性最强($R^2 = 0.94$), 水深反演精度最高(均方根误差为 1.0 m, 相对均方根误差为 0.15)。研究揭示了综合主被动卫星数据分析极地冰盖水文过程的良好潜力。

关键词: 冰面湖; PlanetScope; ICESat-2; 水深反演

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A

文章编号: 2097-034X(2024)04-0314-07

0 引言

极地冰盖物质平衡对于全球海平面上升具有重要的影响, 是预测未来全球海平面上升的最大不确定性来源^[1]。冰面消融是造成极地冰盖物质损失的重要原因。每年消融期, 格陵兰冰盖与南极冰盖表面消融产生大量冰面融水, 融水在地形等因素作用下汇集至低洼处形成冰面湖^[2-3]。冰面湖广泛分布于极地冰盖表面, 能够存储大量冰面融水, 进而影响冰盖水文过程^[4]。其中, 部分冰面湖存储大量融水后, 湖底破裂并输送冰面融水进入冰盖内部甚至底部, 减小冰盖运动阻力, 进而影响冰盖运动速度与稳定性^[5-6]。因此, 准确测算冰面湖水深信息, 进而估算冰面湖体积及其动态变化, 对于更好地理解极

地冰盖水文过程及其影响、准确揭示冰盖物质平衡与稳定性具有重要意义。

实地测量冰面湖水深最为准确, 但是极地冰盖自然条件恶劣, 实测工作成本高、难度大, 测量过程危险系数高, 需要很好的后勤保障条件, 并且仅能获取有限数量的水深测量结果。Box 等^[7]利用测深仪测量了格陵兰冰盖西部 2 个冰面湖的深度, 测量精度高达 0.1 m; Tedesco 等^[8]利用配备 GPS、声纳和光谱仪的遥控船测量了格陵兰冰盖西部 Olivia 冰面湖的深度; Legleiter 等^[9]同样利用遥控无人船测量了格陵兰冰盖西南部 2 个冰面湖的深度, 测量精度可达 0.025 m。

近年来, 遥感技术已经广泛应用于冰面湖水深反演, 遥感反演的基本原理是建立多波段光学遥感影像反射率与实测水深值之间的定量关系。Fitz-

收稿日期: 2023-06-25; 修订日期: 2023-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目子课题“复杂陆地海洋环境异常动态遥感监测”(编号: 2022YFB3903601)和国家自然科学基金面上项目“格陵兰北部地区融水汇流过程遥感观测、模拟与影响分析”(编号: 42271320)共同资助。

第一作者: 朱雨欣(2001-), 女, 本科, 主要从事冰冻圈水文遥感研究。Email: yuxin_zhu_nju@163.com。

通信作者: 杨康(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事冰冻圈水文遥感研究。Email: kangyang@nju.edu.cn。

patrick 等^[10] 基于 Box 等^[7] 的实测水深数据和 MODIS 遥感影像反演了格陵兰冰盖西部冰面湖水深; Legleiter 等^[9] 利用实测水深数据建立了适用于 WorldView2 遥感影像的格陵兰冰盖融水深度反演经验公式; Pope 等^[11] 基于 Tedesco 等^[8] 的实测水深数据结合 Landsat8 影像建立了格陵兰冰面湖水深反演经验公式。然而,实测水深数据数量十分有限,难以推广到长时序的冰面湖水深遥感反演。近年来,有研究使用汇水前和排水后的干涸冰面地形洼地计算冰面湖水深,作为实测水深数据的替代。Moussavi 等^[12] 利用 WorldView 数字地形模型提取干涸地形洼地信息,与冰面湖轮廓相交获取冰面湖水深,进而建立了冰面湖水深反演经验公式。

ICESat-2 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2) 卫星于 2018 年发射,激光雷达穿透性强、精度高且数据覆盖范围广,激光波束能够穿透水体并被水面和水底反射,反演浅海水深 (<30 m) 精度较高,均方根误差 (root mean square error, RMSE) 均在最大水深的 10% 以内^[13-15]。最近几年,ICESat-2 已开始被用于极地冰盖冰面湖水深 (<15 m) 反演。Fair 等^[16] 利用 ICESat-2 激光测高数据反演冰面湖水深,发现水深遥感反演误差为 0.12~0.80 m。Fricke 等^[17] 同样基于 ICESat-2 激光测高数据反演了南极冰盖东部 Amery 冰架冰面湖水深,结果显示其精度高于基于光学遥感影像的水深反演方法。

ICESat-2 仅能提供沿着激光点云轨迹的冰面湖剖面水深反演结果,为了进一步反演整个冰面湖的水深,需要综合光学卫星遥感影像与 ICESat-2 激光测高数据。目前,此类研究通常聚焦于中等空间分辨率 (10~30 m) 光学卫星遥感影像数据,水深反演结果精度有限、分辨率不足。以 PlanetScope 为代表的

光学小卫星遥感影像则兼具高时空分辨率 (理想情况下重访周期约 1 d,空间分辨率 3 m),并且可以免费获取。目前,PlanetScope 遥感影像已开始初步应用于冰面湖相关研究。Qayyum 等^[18] 利用 PlanetScope 遥感影像和深度学习算法提取冰面湖轮廓遥感信息,提取的冰面湖数量显著多于同期 Landsat OLI 影像提取结果,这说明 PlanetScope 影像较高的时空分辨率在冰面湖监测中具有显著优势; Datta 等^[19] 基于 ICESat-2 数据和 PlanetScope Dove-R 4 波段遥感影像,利用红光和绿光波段初步反演了格陵兰冰盖西部冰面湖水深,然而并未分析 PlanetScope 水深反演的最佳波段组合。

2020 年 3 月起,PlanetLabs 公司开始发布 PlanetScope SuperDove 光学小卫星 8 波段影像,这一影像在 PlanetScope Dove-R 小卫星 4 波段遥感影像的基础上新增了 4 个波段,并且通过 Sentinel-2 基准影像进行了辐射校正,数据质量显著提升^[20]。本研究利用 PlanetScope SuperDove 光学小卫星 8 波段影像,探索各个波段在冰面湖水深反演方面的潜力,综合 PlanetScope 小卫星 8 波段地表反射率遥感影像与 ICESat-2 激光测高数据,选取了 4 个位于格陵兰冰盖东北部的冰面湖,使用自适应核密度估计自动化分离并拟合 ICESat-2 数据湖面与湖底点云,进而获取冰面湖水深观测结果,再结合同时期 PlanetScope 影像各波段光谱反射率,利用最佳波段比值分析比较不同波段与 ICESat-2 水深数据的相关关系,选取适用于水深反演的最佳波段,构建并应用水深反演经验公式。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

本研究选择格陵兰冰盖东北部作为研究区,选择该区域内 4 个冰面湖作为研究对象 (图 1)。

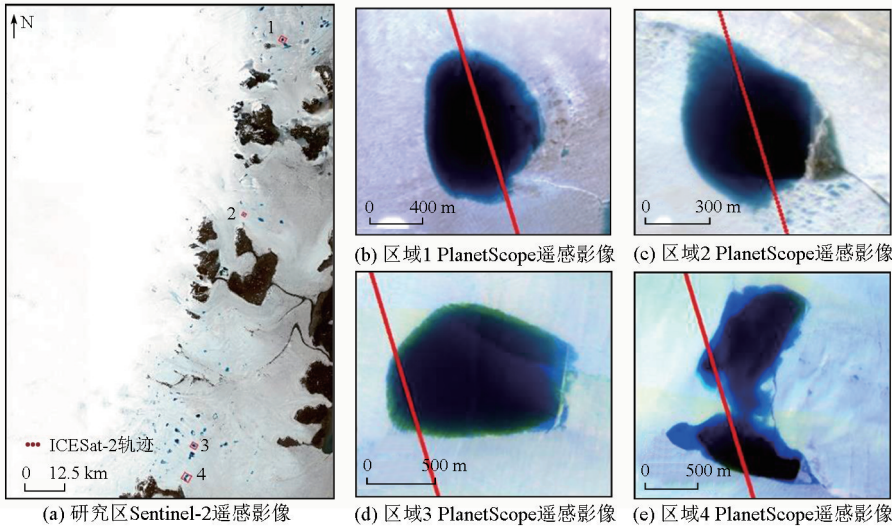


图 1 研究区 Sentinel-2 遥感影像及局部区域 PlanetScope 遥感影像

Fig.1 Remote sensing images of study area and PlanetScope images of local areas

格陵兰冰盖是全球仅次于南极冰盖的第二大冰盖,冰盖总面积约为 $1.74\times 10^6\text{ km}^2$,总体积约为 $2.93\times 10^6\text{ km}^3$,冰储量约占全球总冰量的 $7\%\sim 9\%$ ^[21]。近几十年来,格陵兰冰盖北部地区消融加速,已成为冰盖物质损失增速最快的地区^[22],每年消融期,格陵兰冰盖北部都会分布大量冰面湖,冰面湖融水储量及其对冰盖物质平衡的影响值得关注。

1.2 数据源

研究选用由 Planet Labs 公司生产并发布的 PlanetScope SuperDove Level 3B 地表反射率(surface

reflectance, SR)数据产品,该数据经过传感器校正、以 Sentinel-2 遥感影像为基准的辐射校正和正射校正^[20],进一步基于 6S 辐射传输模型和 MODIS 近实时数据完成了大气校正,具有海岸带蓝光(B1,431~452 nm)、蓝光(B2,465~515 nm)、绿光 I (B3,513~549 nm)、绿光 II (B4,547~583 nm)、黄光(B5,600~620 nm)、红光(B6,650~680 nm)、红边(B7,697~713 nm)与近红外(B8,845~885 nm) 8 个波段,空间分辨率为 3 m。研究选用 2021 年 7 月 4 景云量较少的 PlanetScope 遥感影像(表 1)。

表 1 研究数据列表
Tab.1 Data list

区域编号	数据获取时间	ICESat-2 数据编号	PlanetScope 影像编号
1	2021-07-20	20210720053125_04061205_005_01	20210720_135021_19_2455
2			20210720_144349_03_2405
3			20210720_133408_92_242d
4			20210720_133408_92_242d

ICESat-2 是专用于测量极地冰盖的卫星^[23],发射于 2018 年 9 月,是美国继 ICESat 后发射的新一代星载激光雷达卫星,搭载了先进的地形激光测高系统(advanced topographic laser altimeter system, ATLAS)。ICESat-2/ATLAS 采用多波束微脉冲激光器,共有 6 个不同的激光波束,分别为 3 对强弱激光波束(强弱能量比约为 4:1): GT1L/R,GT2L/R 和 GT3L/R^[24]。不同激光波束沿垂直轨道方向平行排列,2 对激光波束之间距离约 3.3 km,每对强弱激光波束之间相距为 90 m,以高频率(10 kHz)发射绿色(532 nm)激光脉冲,在清澈水域中探测深度可达到 40 m^[25],具备代替实地测量水深的能力^[26]。ICESat-2 的轨道高度为 500 km,轨道倾角约 92°,沿轨道大约每 0.7 m 记录一个激光脉冲,ICESat-2 能够记录每个返回卫星的光子的时间与坐标^[27]。同时,ICESat-2 数据覆盖全球,因此适用于极地等难以实地测量水深真值的区域^[28]。

研究采用 ICESat-2 ATLAS 的 ATL03 和 ATL06 数据,ATL03 数据是全球地理定位光子数据,ATL06 数据是 3A 级陆地冰高程数据。ATL03 数据经过了必要的地球物理校正过程,包括地球固体潮汐校正和海洋潮汐校正等^[29]。Yuan 等^[30]通过 ICESat-2 激光测高数据和水位观测数据研究了中国面积大于 10 km^2 的湖泊和水库,结果显示 ICESat-2 数据的相对测高误差为 0.06 m,说明 ICESat-2 测高数据精度较高。ATL03 数据提供生产 3A 级数据产品的所有光子的经纬度与高程信息,ATL06 数据由 ATL03 数据处理得到,利用 ATL03 识别的信号光子数据,以 20 m 为固定间隔沿轨生产陆地表面冰高程数据,以

40 m 范围内信号光子数据中值生成高程^[31]。研究通过美国冰雪数据中心网站(<https://nsidc.org/data/icesat-2/data>) 下载获取 ICESat-2 ATL03 和 ATL06 HDF 格式数据。

2 研究方法

2.1 ICESat-2 冰面湖水深拟合方法

研究以 ICESat-2 ATL03 和 ATL06 光子数据为输入,利用自适应核密度估计算法自动化输出冰面湖湖面和湖底高程^[19]。首先,去除高于 1 500 m 的点,根据 ATL06 的光子点云高程筛选其上下 50 m 范围内的 ATL03 光子点。以每 75 个 ATL03 光子点作为集合,获取 3 个具有最大概率密度的高度值,分别为冰面湖表面高程、冰面湖湖底高程和一个可能为湖面下冰的高程。再次,以每 5 000 个 ATL03 光子点作为集合,去除异常值,进行平滑、滤波等操作,判断冰面湖表面特征(例如是否存在浮冰)。最后,采用 Parrish 等^[26]的方法完成折射校正,获得冰面湖湖面和湖底的高程估算结果,计算两者高程差作为最终的冰面湖水深数据。ICESat-2 ATL03 光子点云数据沿轨间隔约 0.7 m,PlanetScope 遥感影像空间分辨率为 3 m,因此对每个遥感影像元范围内所有光子点计算得到的水深取平均值,作为该像元对应的水深数据。以水深 1 m 为间隔对所有水深数据分层抽样,抽取 70%作为训练数据,剩余 30%作为验证数据。

2.2 PlanetScope 水深反演经验公式建立

研究选用统计经验模型,通过建立 PlanetScope

遥感影像光谱反射率和 ICESat-2 水深数据之间的回归关系反演冰面湖水深。水深反演模型的表达形式选择幂函数、指数函数、二次函数和对数函数。为了基于遥感影像光谱特征建立水深反演模型,需要选择适当的光谱波段,由于不同波段及波段组合对水深响应的敏感程度不同,利用最佳波段比值分析(optimal band ratio analysis, OBRA)选取最佳波段(组合)。将 N 个光谱波段对应的反射率两两组合取比值(B_x/B_y),得到遥感影像所有可能的波段组合比值。由于波段比值结果值域较大,所以计算其对数,取对数后能够缩小数据的绝对数值,方便后续计算,同时不会改变数据的性质和相对关系,最终以 $\ln(B_x/B_y)$ 和单波段反射率作为 X 。分别建立水深数据与 X 的回归模型并计算决定系数 R^2 ,用于评估回归模型的拟合优度。因为 X 是 OBRA 回归中唯一的自变量,所以唯一影响回归模型拟合结果的就是不同波段(组合)的选取,故拟合结果最高 R^2 的 X 是最佳波段(组合)。OBRA 可以根据不同的数据集

选择最适宜建立水深反演模型的波段(组合)。最终基于最佳波段(组合)建立水深反演经验公式,并利用该公式预测验证样本的水深,计算预测水深和 ICESat-2 水深数据的 RMSE 和相对均方根误差(relative root mean squared error,RRMSE),评价所得水深反演经验公式的精度。

3 结果与分析

由 ICESat-2 数据拟合的冰面湖剖面结果可知(图 2),冰面湖湖面和湖底处光子点云密度较大,明显区分于背景光子点云,拟合的冰面湖湖面和湖底结果呈现为较平滑的曲线,并且基本符合 ICESat-2 ATL03 光子点云的分布,能够反映冰面湖湖面和湖底的高程,可以清晰地表现出冰面湖水深的变化。研究选用的 4 个湖泊内共获得 1 355 组样本数据,其中 ICESat-2 水深数据最大值约为 15.7 m,具有一定代表性。

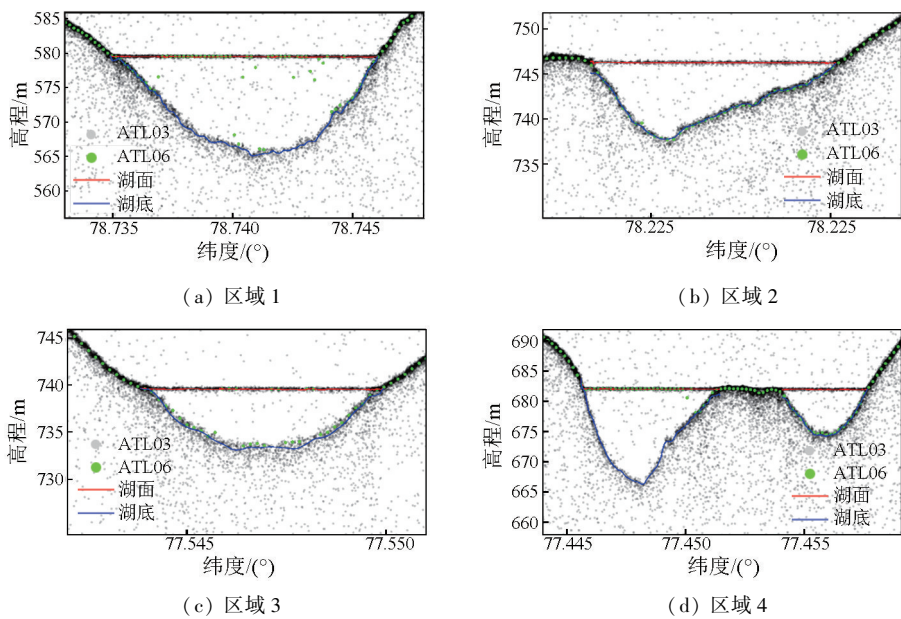


图 2 冰面湖剖面拟合结果

Fig.2 Fitting results of supraglacial lake profile

研究利用 OBRA 确定最佳波段(组合),分别计算不同波段(组合)水深反演经验公式拟合结果 R^2 并绘制热力图(图 3),结果显示,绿光波段在 4 种函数模型中均与 ICESat-2 水深数据具有很强的相关性。红光在水中比绿光和蓝光衰减速率更快,因此,对于相同的湖深变化,红光波段的遥感影像光谱反射率变化比绿光和蓝光波段的变化更大。然而,红光波段由于衰减迅速,仅在较浅的湖泊深度范围内

与水深数据相关性较强,红光波段适用于水深反演的最大湖泊深度约为 5 m^[11]。研究选取的湖泊最深处约 15.7 m,超出了红光波段的适用范围,而绿光、蓝光波段及其与海岸带波段的组合和水深数据表现出较强的相关性,其中,绿光 I 波段与 ICESat-2 水深数据在指数函数模型中相关性最强($R^2 = 0.94$),因此确定绿光 I 波段为本研究中用于建立水深反演模型的最佳波段。

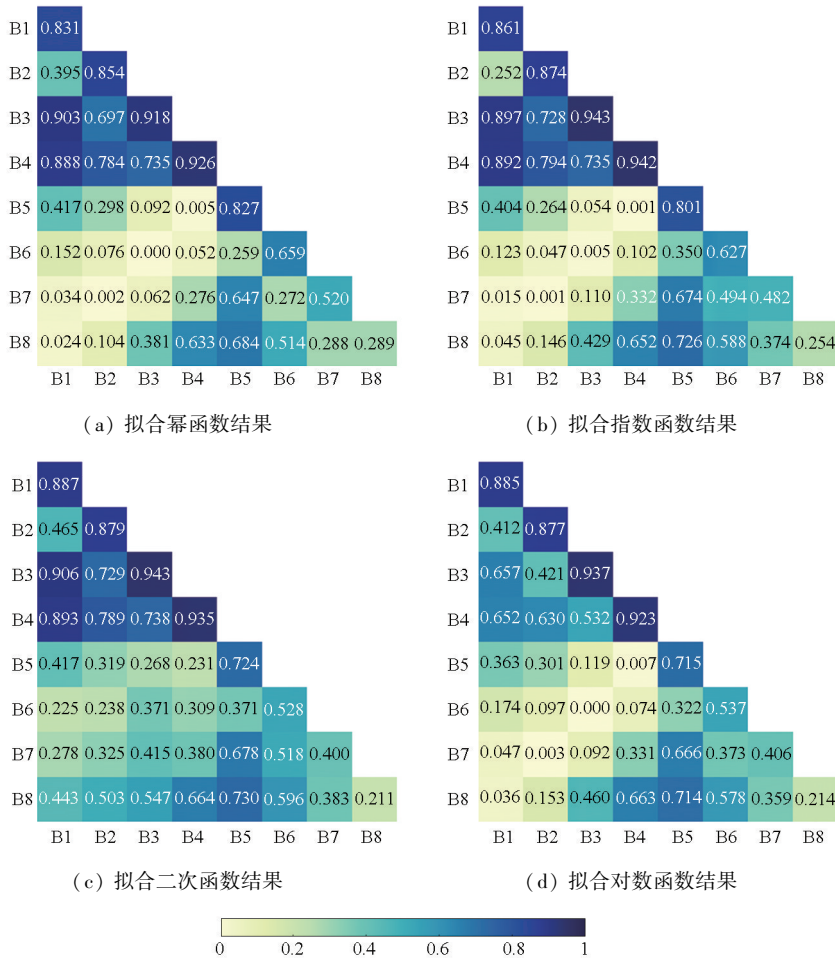


图 3 不同波段 (组合) 拟合经验公式结果 R^2 对比

Fig.3 R^2 results of empirical formulae fitted to different bands

研究选取绿光 I 波段与水深数据,利用足够数量的样本点建立指数函数作为冰面湖水深反演经验公式,计算得到验证样本(水深<15.7 m)中水深数据和绿光 I 波段反射率的相关性很强($R^2=0.94$), $RMSE=1.0$ m, $RRMSE=0.15$,误差较小(图 4),与已有研究相当(RMSE 低于最大水深的 10%),说明结合高空间分辨率 PlanetScope 遥感影像与 ICESat-2 数据,利用 OBRA 选取最佳波段,建立函数模型,能够得到精度较高的冰面湖水深反演经验公式。

Datta 等^[19]利用单个冰面湖范围中的 ICESat-2 光子点云数据,结合对应的影像光谱值建立了独立的水深经验公式。本研究综合利用了 4 个冰面湖中的数据,建立了一个共同的冰面湖水深反演经验公式,用于建立水深反演模型的样本点数量更多,建立的水深反演经验公式更为可靠。

研究将冰面湖水深反演经验公式应用于区域 3 和区域 4 所在的一景 PlanetScope 遥感影像范围内,反演该区域内冰面湖水深,结果显示(图 5)区域内冰面湖水深介于 1.3~18.3 m 之间,计算得到总体积约为 0.10 km³。由此可见,可以通过本文构建的冰面湖水深反演经验公式测算冰面融水存储量,尤其是考虑到 PlanetScope 遥感影像的高重访观测次数,后续研究可以进一步分析冰面融水储量的动态变化,从而提升对冰面水文过程的理解。然而,本文提出的综合主被动卫星数据的方法仅能反演冰面开放水体对应的深度,无法观测到被浮冰覆盖的水体部分(图 5),因此遥感反演得到的冰面湖总体积低于实际冰面湖总体积,这一问题后续可以通过数字地形模型模拟干涸冰面地形洼地予以解决。

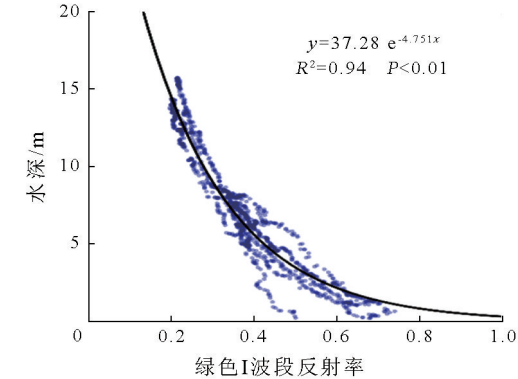
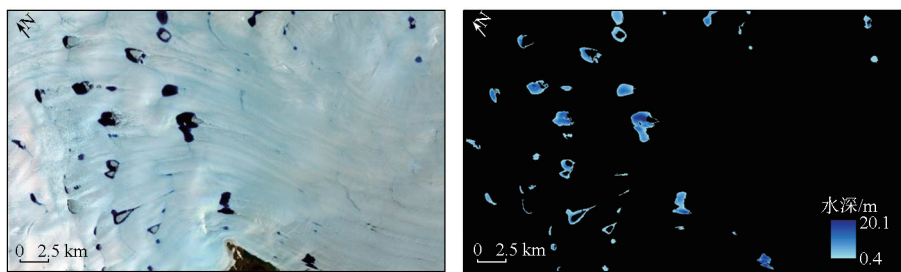


图 4 冰面湖水深反演经验公式拟合结果
Fig.4 Results of fitting the empirical formula for supraglacial lake bathymetry estimation



(a) PlanetScope B8(R), B6(G), B4(B)假彩色合成影像 (b) 冰面湖水水深反演结果

图 5 PlanetScope 遥感影像及其反演结果

Fig.5 PlanetScope image and result of supraglacial lake bathymetry estimation

4 结论

本研究使用 ICESat-2 激光测高点云数据,自动化分离并拟合冰面湖湖面与湖底点云,进而获取冰面湖水深观测结果,然后利用同时期高空间分辨率(3 m) PlanetScope 光学小卫星多波段地表反射率遥感影像,分析不同波段(组合)与 ICESat-2 水深数据的相关关系,选取最佳波段(组合)建立水深反演经验公式。主要结论如下: PlanetScope 遥感影像绿光 I 波段与水深数据之间相关性最强 ($R^2 = 0.94$), 基于该波段以指数函数为模型建立的水深反演经验公式精度较高 ($RMSE = 1.0\text{ m}$, $RRMSE = 0.15$)。总结来说,结合高空间分辨率 PlanetScope 遥感影像与 ICESat-2 数据,利用 OBRA 对比 PlanetScope 不同波段拟合经验公式结果选取最佳波段(组合),建立函数模型,能够得到精度较高的冰面湖水深反演经验公式。研究揭示了综合主被动卫星数据分析极地冰盖水文过程的良好潜力。

参考文献 (References):

[1] Bamber J L, Westaway R M, Marzeion B, et al. The land ice contribution to sea level during the satellite era[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(6): 063008.

[2] 杨 康. 格陵兰冰盖表面消融研究进展[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 101-109.

Yang K. The progress of Greenland Ice Sheet surface ablation research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 101-109.

[3] McMillan M, Nienow P, Shepherd A, et al. Seasonal evolution of supraglacial lakes on the Greenland Ice Sheet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 262(3/4): 484-492.

[4] 杨 康, 刘 巧. 冰川表面水文过程研究进展[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1666-1678.

Yang K, Liu Q. Supraglacial drainage system: A review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1666-1678.

[5] Stevens L A, Behn M D, McGuire J J, et al. Greenland supraglacial lake drainages triggered by hydrologically induced basal slip[J]. Nature, 2015, 522(7554): 73-76.

[6] Tuckett P A, Ely J C, Sole A J, et al. Rapid accelerations of Antarctic Peninsula outlet glaciers driven by surface melt[J]. Nature

Communications, 2019, 10: 4311.

[7] Box J E, Ski K. Remote sounding of Greenland supraglacial melt lakes: Implications for subglacial hydraulics[J]. Journal of Glaciology, 2007, 53(181): 257-265.

[8] Tedesco M, Steiner N. In-situ multispectral and bathymetric measurements over a supraglacial lake in western Greenland using a remotely controlled watercraft[J]. The Cryosphere, 2011, 5(2): 445-452.

[9] Legleiter C J, Tedesco M, Smith L C, et al. Mapping the bathymetry of supraglacial lakes and streams on the Greenland ice sheet using field measurements and high-resolution satellite images[J]. The Cryosphere, 2014, 8(1): 215-228.

[10] Fitzpatrick A A W, Hubbard A L, Box J E, et al. A decade (2002-2012) of supraglacial lake volume estimates across Russell Glacier, West Greenland[J]. The Cryosphere, 2014, 8(1): 107-121.

[11] Pope A, Scambos T A, Moussavi M, et al. Estimating supraglacial lake depth in West Greenland using Landsat 8 and comparison with other multispectral methods[J]. The Cryosphere, 2016, 10(1): 15-27.

[12] Moussavi M S, Abdalati W, Pope A, et al. Derivation and validation of supraglacial lake volumes on the Greenland Ice Sheet from high-resolution satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 183: 294-303.

[13] Hsu H J, Huang C Y, Jasinski M, et al. A semi-empirical scheme for bathymetric mapping in shallow water by ICESat-2 and Sentinel-2: A case study in the South China Sea[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 178: 1-19.

[14] Albright A, Glennie C. Nearshore bathymetry from fusion of Sentinel-2 and ICESat-2 observations[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(5): 900-904.

[15] Xu N, Ma X, Ma Y, et al. Deriving highly accurate shallow water bathymetry from Sentinel-2 and ICESat-2 datasets by a multitemporal stacking method[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 6677-6685.

[16] Fair Z, Flanner M, Brunt K M, et al. Using ICESat-2 and Operation IceBridge altimetry for supraglacial lake depth retrievals[J]. The Cryosphere, 2020, 14(11): 4253-4263.

[17] Fricker H A, Arndt P, Brunt K M, et al. ICESat-2 meltwater depth estimates: Application to surface melt on Amery Ice Shelf, East Antarctica[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(8): e2020GL090550.

[18] Qayyum N, Ghuffar S, Ahmad H, et al. Glacial lakes mapping using multi satellite PlanetScope imagery and deep learning[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(10): 560.

[19] Datta R T, Wouters B. Supraglacial lake bathymetry automatically derived from ICESat-2 constraining lake depth estimates from

multi-source satellite imagery[J].The Cryosphere,2021,15(11): 5115–5132.

[20] Roy D P,Huang H,Houborg R,et al.A global analysis of the temporal availability of PlanetScope high spatial resolution multi-spectral imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 264: 112586.

[21] Bamber J L,Layberry R L,Gogineni S P.A new ice thickness and bed data set for the Greenland ice sheet; 1.Measurement,data reduction,and errors [J].Journal of Geophysical Research; Atmospheres,2001,106(D24):33773–33780.

[22] Noël B,van de Berg W J,Lhermitte S,et al.Rapid ablation zone expansion amplifies North Greenland mass loss [J].Science Advances,2019,5(9):eaaw0123.

[23] Abdalati W,Zwally H J,Bindschadler R,et al.The ICESat-2 laser altimetry mission[J].Proceedings of the IEEE,2010,98(5):735–751.

[24] Babbal B J,Parrish C E,Magruder L A.ICESat-2 elevation retrievals in support of satellite-derived bathymetry for global science applications [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48 (5): e2020GL090629.

[25] Rannal H,Sigaard Christiansen P,Kliving P,et al.Evaluation of a statistical approach for extracting shallow water bathymetry signals from ICESat-2 ATL03 photon data [J].Remote Sensing,2021,13(17):3548.

[26] Parrish C E,Magruder L A,Neuenschwander A L,et al.Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS’s bathymetric mapping performance [J].Remote Sensing,2019,11(14): 1634.

[27] Cao B,Fang Y,Gao L,et al.An active-passive fusion strategy and accuracy evaluation for shallow water bathymetry based on ICESat-2 ATLAS laser point cloud and satellite remote sensing imagery [J].International Journal of Remote Sensing,2021,42(8):2783–2806.

[28] Li Y,Gao H,Zhao G,et al.A high-resolution bathymetry dataset for global reservoirs using multi-source satellite imagery and altimetry [J].Remote Sensing of Environment,2020,244:111831.

[29] Neumann T A,Martino A J,Markus T,et al.The Ice,Cloud,and Land Elevation Satellite - 2 mission: A global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System [J].Remote Sensing of Environment,2019,233:111325.

[30] Yuan C,Gong P,Bai Y.Performance assessment of ICESat-2 laser altimeter data for water-level measurement over lakes and reservoirs in China [J].Remote Sensing,2020,12(5):770.

[31] Smith B,Fricker H A,Holschuh N,et al.Land ice height-retrieval algorithm for NASA’s ICESat-2 photon-counting laser altimeter [J].Remote Sensing of Environment,2019,233:111352.

Remote sensing-based bathymetry retrieval of supraglacial lakes on polar ice sheets using images from small optical satellite PlanetScope and ICESat-2 laser altimetry data

ZHU Yuxin^{1,2,3}, MAN Mengtian^{1,2,3}, WANG Yuhan^{1,2,3}, CHEN Dinghua^{1,2,3}, YANG Kang^{1,2,3}

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing 210023, China; 3. Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing 210023, China)

Abstract: During the melt season, supraglacial lakes are widely distributed across polar ice sheets, storing large amounts of surface meltwater. When some of these supraglacial lakes rupture at the bottom, the released meltwater infiltrates ice sheets, affecting their movement and stability. Therefore, accurate bathymetry retrieval of supraglacial lakes and estimating the volume of supraglacial lakes are significant for understanding the hydrological processes of polar ice sheets. However, field measurement of supraglacial lake depth is difficult, costly, and small-scale. Meanwhile, the bathymetry models derived from optical satellite images with low to medium spatial resolutions are insufficiently accurate. Given these, this study conducted the bathymetry retrieval of supraglacial lakes based on eight-band remote sensing images from the small-size optical satellite PlanetScope SuperDove (spatial resolution: 3 m) and ICESat-2 laser altimetry data. First, the ICESat-2 laser altimetry point clouds data for the lake surface and bottom were separated and modeled using adaptive kernel density estimation to derive lake depth observations. Second, Optimal Band Ratio Analysis (OBRA) was used to examine the correlations between various bands of PlanetScope images (and combinations thereof) and ICESat-2 bathymetry data, leading to the development of four kinds of empirical formulas for the bathymetry retrieval of supraglacial lakes: quadratic, exponential, power, and logarithmic functions. Then, four supraglacial lakes covered by concurrent PlanetScope and ICESat-2 data were selected to test the retrieval accuracy. The results indicate that the Green I band of PlanetScope is the most favorable for the bathymetry retrieval, demonstrating the strongest correlation with the ICESat-2 derived depths ($R^2=0.94$) and the highest inversion accuracy ($RMSE=1.0\text{ m}$, $RRMSE=0.15$). The study reveals that integrating active and passive satellite data has great potential for analyzing hydrological processes in polar ice sheets.

Keywords: supraglacial lake; PlanetScope; ICESat-2; bathymetry

(责任编辑: 陈 庆)