

湖冰遥感研究进展

童洁^{1,2}, 高永年², 詹鹏飞^{1,3}, 宋春桥¹

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 流域地理学重点实验室, 南京 210008;

2. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 湖冰作为冰冻圈的重要组成部分, 是反映全球气候变化最为直观的指示器之一。在气候变暖和人类活动加剧影响的背景下, 全球湖泊冰情总体呈现冻结时间推迟、消融时间提前、冰期缩短、冰厚减薄等趋势特征。由于现场勘测的局限性, 遥感技术在湖冰监测中发挥了越来越重要的作用。已有大量研究利用不同的遥感传感器、采用不同的湖冰参数与冰情物候特征对湖冰及其响应气候变化特征开展研究。本文首先结合国内外湖冰遥感监测现状, 综述了湖冰监测常用的遥感数据源; 再从湖冰范围识别方法、湖冰物候和冰厚参数遥感反演3方面展开论述, 并重点总结了当前湖冰研究热点区域及冰情变化趋势; 最后, 结合当前遥感技术的发展, 探讨了未来多源遥感技术集成在湖冰监测中的应用潜力, 以及对气候变化响应十分敏感的青藏高原地区湖冰研究的挑战。

关键词: 湖冰, 湖冰物候, 冰厚, 遥感监测, 气候变化

中图分类号: P237/P2

引用格式: 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

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 [DOI: 10.11834/jrs.20232447]

1 引言

全球 1.17 亿个湖泊中, 有一半以上的湖泊间歇或长期被湖冰所覆盖 (Verpoorter 等, 2014; Wang 等, 2021)。湖冰不仅是冰冻圈的重要组成部分, 也是区域乃至全球气候的指示器 (Johnson 和 Stefan, 2006)。一方面, 湖冰季节性特征显著, 能够直观反映出气温的变化。已有研究 (Hodgkins, 2013) 表明长时间序列的湖冰观测数据可作为代用气候记录。另一方面, 随着湖冰的变化, 湖泊表面的反射率等属性也会发生变化, 进而影响湖泊和大气的物质和能量交换, 加剧气候变化 (Johannessen 等, 1992; 王智颖 等, 2017)。

早期的湖冰观测方法主要是野外观测, 由湖岸边的水文观测站每日记录湖冰物候信息, 并通过钻孔的方式测量湖冰厚度 (Kuusisto, 1994), 之后借助声呐 (Marko 和 Jasek, 2010)、电磁波、超声波仪器等进行湖冰厚度观测 (李志军 等,

2005)。但这些观测方式有较大的局限性: (1) 耗费大量的人力物力, 且观测站分布不均, 对于大型湖泊的观测更加密切, 但绝大多数中小型湖泊缺少观测数据, 因此很难获得大范围的湖冰数据; (2) 大多数存在冰期的湖泊其观测环境恶劣、可达性有限, 难以获得准确的湖冰物候; (3) 早期观测标准难以统一, 缺乏观测精度一致、长时序的观测数据 (Duguay 等, 2015)。此外, 人工湖冰物候监测点在 1980 年后持续下降, 观测网几乎消失, 数据缺失严重 (姚晓军 等, 2015)。

随着遥感技术的不断发展, 卫星遥感提供了大规模、长时序、高时间分辨率的对地观测数据, 弥补了观测站人工监测的不足, 有助于更高效地进行湖冰监测。同时, 在全球变暖的大前提下, 越来越多的学者利用遥感手段开始了对湖冰及其属性的研究。通过“Web of Science”核心数据库, 对检索主题为“lake ice”的 2000 年—2021 年的论文数量、被引频次 (图 1) 和论文关键词词频进行

收稿日期: 2022-09-02; 预印本: 2023-04-14

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(编号: XDA23100102); 第二次青藏高原综合科学考察研究(编号: 2019QZKK0202)

第一作者简介: 童洁, 研究方向为湖冰遥感。E-mail: tongjie@hhu.edu.cn

通信作者简介: 宋春桥, 研究方向为湖泊一流域水文遥感、资源环境遥感与全球变化。E-mail: cqsong@niglas.ac.cn

具有重访周期短、扫描带宽等优点。Landsat 系列以及 Sentinel-2 A/B 卫星具有更高空间分辨率（部分波段可达 10—30 m）、长时间序列的优势，成为研究冰情动态信息的重要手段（汪关信等，2020），但是时间分辨率低（Landsat 系列卫星的重访周期为 16—18 d，Sentinel-2 卫星的单星重访周期为 10 d），不能逐日监测，单一传感器观测难以在湖冰遥感物候监测中使用，若搭配其他遥感影像进行辅助判别（吴其慧等，2019），可以更加准确的提取中小型湖泊的湖冰物候信息。随着国产卫星的不断发展，天宫二号（王琼等，2019）、高分系列卫星等也越来越多的应用于湖冰遥感监测中，GF-1 和 GF-6 卫星的多光谱空间分辨率为 16 m，二者结合部分地区的重访周期可达 2—4 d（庄立超等，2021）。

2.1.2 微波遥感

微波遥感又分为被动微波遥感和主动微波遥感，前者测量物体热辐射，用亮温值来度量地物属性，后者通过发射电磁波获取地物后向散射系数来探测地物属性。与水体相比，冰的亮温值和后向散射系数值都较高（Kouraev 等，2007b），且均随着冰厚的增加而增加（Wakabayashi 等，1993）。因此，利用水体和冰的亮温与后向散射差异，可以获取湖冰物候（Walker 和 Davey，1993）和冰厚信息（Kang 等，2014）。

常用于湖冰监测的被动微波传感器包括 SMMR（Scanning Multichannel Microwave Radiometer）（Cai 等，2017）、SSM/I（Special Sensor Microwave/Imagery）（Lemmetyinen 等，2011）、AMSR-E/2（Advanced Microwave Scanning Radiometer Earth Observing System）（Du 等，2017）和 MWRI（Microwave Radiation Imager）（阮永俭等，2017）等，其中，MWRI 是中国第二代极轨气象卫星风云三号（FY-3）上搭载的微波成像仪，近年来在湖冰遥感监测中也得到了应用。被动微波数据虽然可以达到每日重访，但空间分辨率都比较低（部分 25000 m），岸线混合像元对湖冰识别精度影响较大，一般只适用于大型湖泊（比如 > 500 km²）的湖冰监测（汪关信等，2020）。

主动微波遥感主要传感器类型包括侧视真实孔径雷达 SLAR（Side-Looking Airborne Radar）、合成孔径雷达 SAR（Synthetic Aperture Radar）、散射

计及雷达高度计 RA（Radar Altimeter）（汪关信等，2020）。其中，SAR 是最常见的主动微波传感器，在过去 50 年里，70% 的主动微波湖冰产品都使用了 SAR 数据（Murfitt 和 Duguay，2021）。随着 SAR 的不断发展，也有学者使用 SAR 数据进一步研究湖冰类型（Morris 等，1995；Gherboudj 等，2010）、粗糙度、气泡含量等冰结构（Wakabayashi 等，1993）。1987 年前，利用主动微波遥感进行的湖冰监测研究是基于 SAR 数据的 X 波段，随着欧洲航天局 ESA（European Space Agency）ERS-1 卫星的发射，C 波段 SAR 数据受到越来越多学者的青睐（Murfitt 和 Duguay，2021）。利用 C 波段 SAR 遥感可以很容易地检测到湖水冻结（Hall 等，1994），且对提取湖冰物候信息的准确性较高（Geldsetzer 等，2010）。主动微波遥感数据重访周期较长，不适合独立应用于湖冰物候监测研究。

2.2 其他遥感数据源发展

野外实地探测时，在湖泊薄冰区域直接搭建仪器作业会有一些的危险性，利用航空遥感平台监测是安全有效的方法。航空遥感搭载体积小、成本低、连续性强的探地雷达系统 GPR（Ground Penetrating Radar）在大范围平坦冰面的冰厚监测中发挥着重要作用（刘之平等，2017；靳惠安，2021）。早期的航空遥感采用飞机和直升机载人操作（Arcone 和 Delaney，1987），Weeks 等（1981）使用侧视机载雷达观测了阿拉斯加北坡湖冰。但直升机飞行前需要经过严格的审批，投入大量的时间与成本。无人机 UAV（Unmanned Aerial Vehicle）的发展为航空遥感提供了新的途径。无人机机动性强、事故率低、操作灵活、探测区域受限制小等优点（刘辉等，2020），与探地雷达结合可以更好地发挥二者优势。常用的轻小型无人机测绘遥感飞行平台包括固定翼、旋翼和无人直升机等（Watts 等，2012）。卫星遥感冰厚监测在精度及适应性上还存在局限性，但机载雷达观测数据可为湖冰厚度遥感反演与模拟提供可靠的验证数据（靳惠安，2021）。

2.3 湖冰遥感的数据产品发展

国内外常用于湖冰监测的积雪范围产品如表 1 所示。自 1966 年以来，NOAA 每周都会发布北半球雪冰范围数据产品，其空间分辨率为 190 km

(Ramsay, 1998), 主要是通过手工制作, 因此耗时较长。为了改进这个流程, 生产更及时和精确的产品来替代这一产品, NOAA开发了交互式多传感器冰雪测绘系统IMS (Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System)。IMS是基于被动微波数据SSM/I和站点数据制作的湖泊冻结面积产品, 包含了1997年至今的24 km分辨率和2004年2月至今的4 km分辨率2套北半球冰雪产品 (Tekeli等, 2016)。2014年起IMS数据的分辨率已经提高到1 km, 该数据产品周期短, 适用于大型湖泊的湖冰物候研究 (Dauginis和Brown, 2021; Duguay等, 2015)。1996年, 北温带湖泊长期生态研究项目NLT LTER (North Temperature Lakes Long-Term Ecological Research) 完成制作了全球湖泊和河流冰物候数据库LIAG (Lake Ice Analysis Group), 该数据集包含了北半球湖泊的湖冰物候信息, 主要集中在北美和欧亚大陆 (Warne等, 2020)。

2000年, 美国国家冰雪数据中心NSIDC (National Snow and Ice Data Center) 推出的MODIS冰雪产品MOD10A1/MYD10A1, 包括了陆地、雪、湖泊、湖冰和不确定5大类别, 因其500 m的空间分辨率、8 d时间分辨率等特点, 已广泛应用于区域及半球尺度湖冰监测中 (黄晓东等, 2019)。其中, MOD10A1数据提供2000年至今的冰雪产品, MYD10A1数据提供2002年至今的冰雪产品。2011年发射的新一代对地观测卫星Suomi NPP也推出了冰雪范围覆盖产品NPP_DSCHKD_L3D, 空间分辨率为500 m, 包含陆地、内陆湖、海洋、云、湖冰与积雪等地类。2020年, 欧洲航天局的湖泊气候变化倡议项目基于多源遥感数据制作了全球湖泊产品 (CCI Lakes), 包括1992年—2020年湖泊冰雪覆盖数据集 (Lake Ice Cover, LIC) (Crétaux等, 2020)。

表1 国内外用于大区域湖冰监测的积雪范围产品

Table 1 Snow cover products used for large-area lake ice monitoring

产品名称	覆盖范围	遥感数据源	时间范围	空间分辨率	时间分辨率	湖冰对应属性	数据可用性
IMS	北半球	SSM/I	1997—	24 km	1 d	“sea/lake ice”	https://nsidc.org/data/G02156/versions/1
			2004—	4 km			
			2014—	1 km			
LIAG	北半球	目视解译	1996—2018	多种	多种	“LAKE ICE”	https://nsidc.org/data/G01377/versions/1
MOD10A1	全球	MODIS	2000—	500 m	8 d	产品编码100 对应湖冰	https://nsidc.org/data/MOD10A2/versions/61
MYD10A1			2002—				https://nsidc.org/data/MYD10A1/versions/61
NPP_DSCHKD_L3D	全球	VIIRS	2012—	500 m	1 d	产品编码100 对应湖冰	https://nsidc.org/data/VNP10/versions/1
LIC	北半球	多源(MODIS、OLI、MSI、SAR等)	1992—2020	1 km	1 d	“Lake Ice Cover”	https://climate.esa.int/en/projects/lakes/data/

综合考虑空间分辨率、时间分辨率、数据时间跨度等因素, MOD10A1/MYD10A1产品在现有湖冰研究中最受欢迎, 其空间分辨率(500 m)高于IMS数据(4 km), 准确性也更高 (Brown和Duguay, 2012; Murfitt和Brown, 2017)。VIIRS传感器继承了MODIS传感器的优点, NPP_DSCHKD_L3D产品的起始时间比MOD10A1/MYD10A1产品晚了12年, 空间分辨率相同, 但分类精度有所提高 (周敏强等, 2019)。

3 湖冰识别与湖冰物候、冰厚遥感监测研究进展

3.1 湖冰遥感识别方法

3.1.1 遥感影像目视解译

目视解译时可以通过波段组合的方式来突出显示水体和冰面的差异。如对Landsat 8影像按照波段 (Band-5/6/2) 进行RGB假彩色合成: 由于水

体对可见光波段的强吸收作用, 在湖泊未结冰之前, 水体颜色呈黑色, 水陆边界明显; 而封冻时冰面呈现紫色, 纹理特征明显, 随着冰厚的增加, 冰面颜色也由浅紫色向深紫色过渡。正是水体和冰面颜色、纹理等特征的差异, 目视解译才可以很好的将水体和冰面区分开。

3.1.2 单波段/遥感参量阈值法

单波段/遥感参量阈值法利用单一波段或遥感参量的反射率、亮温或后向散射系数的差异来直接区分水和冰。图4展示了包括冰、雪等物体的反射光谱曲线: 由于水体在近红外波段的反射率较低(殷青军和杨英莲, 2005), 在700 nm以后反射率降低至几乎为0; 而冰在350—850 nm波段仍有较高的反射率, 且随着波长的增加反射率逐渐降低。利用水和冰在近红外波段反射率的差异, 在晴朗无云的情况下, 可以对二者较好的进行区分: 设定阈值 a , 当近红外波段的反射率大于 a 时, 则认为该像元为冰。除此, 由于水和冰的热力差异, 利用亮温数据也可以区分湖冰和水体(Zhu和Woodcock, 2012)。湖冰后向散射系数比水体高, 也可以用于较准确的冰水区分(Kouraev等, 2007b)。

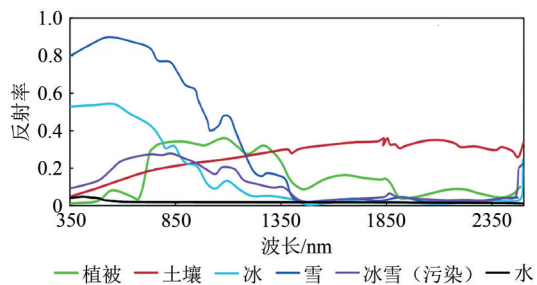


图4 冰、水以及其他主要地物的光谱反射率曲线图 (庞毓雯等, 2020)

Fig. 4 Spectral reflectance curves of ice, water, and several other typical land surface features (Pang et al., 2020)

3.1.3 多波段/遥感参量指数阈值法

多波段/遥感参量指数阈值法是利用水和冰在多个波段或遥感参量的特征差异来构建遥感指数间接提取湖冰的方法。归一化差值积雪指数 NDSI (Normalized Difference Snow Index) 是最常用的指数, 由绿光波段和短波红外波段反射率计算得到(Hall等, 1995), 可以有效地减少植被、建筑阴影等噪声对湖冰监测带来的影响(魏秋方和叶庆华,

2010), 以 MODIS 传感器数据为例, NDSI 的计算公式如下:

$$\text{NDSI} = \frac{\text{Band4} - \text{Band6}}{\text{Band4} + \text{Band6}} \quad (1)$$

式中, Band 4 为 MODIS 数据第 4 波段(绿光)反射率值; Band 6 为 MODIS 数据第 6 波段(短波红外)反射率值。

魏秋方(2010)提出了改进的归一化差值积雪指数 MNDSI (Modified Normalized Difference Snow Index), 由近红外波段和短波红外波段反射率计算得到。这样改进的 MNDSI 在计算水体和冰面时结果反差比 NDSI 要明显, 更有利于区分水体和冰面(勾鹏等, 2015)。MNDSI 的计算公式如下:

$$\text{MNDSI} = \frac{\text{Band2} - \text{Band6}}{\text{Band2} + \text{Band6}} \quad (2)$$

式中, Band 2 为 MODIS 数据第 2 波段(近红外)反射率值; Band 6 为 MODIS 数据第 6 波段(短波红外)反射率值。

还有一种基于被动微波遥感亮温数据的指数阈值法, 由海冰密集度计算方法(Cavalieri等, 1991)演变而来, 是用极化比 PR (Polarisation Ratio) 和频率梯度 GR (Gradient Ratio) 之比来区分水体和冰面(曹梅盛, 2006; Kouraev等, 2007b, 2009), 计算公式如下:

$$\text{PR} = \frac{\text{TB19V} - \text{TB19H}}{\text{TB19V} + \text{TB19H}} \quad (3)$$

$$\text{GR} = \frac{\text{TB37V} - \text{TB19H}}{\text{TB37V} + \text{TB19H}} \quad (4)$$

式中, TB19V、TB19H、TB37V 分别表示 19 GHz 垂直、水平和 37 GHz 垂直极化亮温值。

依据遥感数据源与湖泊所在区域的不同, 分类阈值不一定相同, 通常是设定一个初始阈值, 并以 0.0001 递增/递减试错, 最终得到最佳阈值。初步阈值的设定可以参考阈值法识别湖冰的相关文献(Zhu和Woodcock, 2012; 勾鹏等, 2015; Wang等, 2021; Hall和Riggs, 2007; 孙皓等, 2021; 祁苗苗等, 2018): 红光波段反射率 > 0.1 , 近红外波段反射率 > 0.05 , 红光波段反射率—近红外波段反射率 > 0.01 , 亮温数值 < 3.8 , $\text{NDSI} > 0.15$ 。

3.1.4 机器学习方法

传统的机器学习法识别湖冰的方法是通过通过对遥感影像进行目视解译, 选取典型的湖冰和水体像元建立训练样本集, 再选择合适的分类器对影

像进行分类和湖冰像元的提取。王琼等(2019)基于支持向量机(SVM)分类对色林错湖区的湖冰进行提取,发现支持向量机对于湖冰提取相对传统方法具有更显著的优势,总体分类精度在88.58%以上;随机森林(RF)分类也常用于区分水和冰(Yang等,2022),相较于单波段阈值法和多波段指数阈值法提取精度更高,分类精度为0.9965,验证精度为0.8072(Han等,2020)。Wu等(2021)评价了多个机器学习分类器的湖冰分类精度,包括MLR(多项逻辑回归分析)、SVM、RF、GTB(梯度提升树),其中RF和GTB的分类总体精度都达到了98%及以上,且RF对超参数的选择相对不敏感,有较大潜力用于提取大尺度湖冰分布范围。

随着人工智能技术的发展与突破,基于深度学习的湖冰遥感识别受到广泛关注。这种方法将湖冰检测视为二分类语义分割问题,通过卷积操作提取影像特征,进行湖冰分类,利用深度卷积网络的湖冰识别模型的平均交并比MIoU指标在90%以上(Tom等,2020)。Ma等(2021)结合卷积神经网络和条件随机场,通过遥感影像探测湖水的冻结状态,平均总体精度达到93.10%,且对于小型湖泊有很好的应用效果。

3.1.5 湖冰遥感识别方法比较

遥感影像目视解译法识别湖冰虽然有较高的精度(Gatto,1990),但需要依靠人为主观的经验进行判断,且湖泊众多,遥感数据量巨大,难以实现批量化、定量表达。因此现代的湖冰遥感监测以计算机自动化解译方式为主(庞毓雯等,2020),目视解译主要应用于检验阶段。相对而言,机器学习方法具有高度智能化和分类自动化的优势,但机器学习模型用于冰面识别方法目前大多应用于海冰识别。现有湖冰遥感识别研究主要以单波段/遥感参量阈值法和多波段/遥感参量指数阈值法为主。

单波段/遥感参量阈值法操作简单,根据需求选定适合的判别因子即可,重点和难点在于阈值的确定,其大小将直接影响湖冰提取结果的精度。多波段/遥感参量指数阈值法的阈值较易确定,但会有少量云被误分的情况(贾伟等,2021)。一般而言,只用单个波段或数据进行湖冰监测,可能无法消除大气影响和系统误差,提取结果精度较

差,单阈值法只是湖冰监测方法的一部分,结合多个阈值方法的效果更好(Wang等,2021)。

在利用光学遥感数据监测湖冰方面,孙皓等(2021)选定红光波段和近红外波段之差和红光波段值阈值,对喜马拉雅山北坡4个典型湖泊的湖冰进行提取;基于长期地表温度,Nonaka等(2007)利用温度阈值来监测湖冰消融日期;NSIDC基于MODIS传感器数据利用NDSI指数阈值法创建的MOD10A1/MYD10A1冰雪产品。对于微波遥感数据,监测湖冰常用阈值法通常是基于后向散射系数和亮温值数据,或利用PR和GR之比来区分水体和冰面。

3.2 湖冰物候遥感监测

湖冰物候主要包括4个关键时间节点:湖面开始结冰的时间点—开始冻结时间FO(Freeze Onset);湖面首次出现全部冻结的时间点—完全冻结时间FU(Freeze-Up date);湖冰开始融化的时间点—开始消融时间BO(Break Onset);湖冰完全融化的时间点—完全消融时间BU(Break-Up date)。由这4个时间节点可以进一步推算湖冰冰期DI(开始冻结和完全消融时间之间的长度)和湖冰完全封冻期DCI(完全冻结和开始消融时间之间的长度)。

湖冰物候遥感监测一般是按照湖冰覆盖占湖泊总面积的比值来确认湖冰物候特征参数(Weber等,2016)。随着湖面温度的下降,湖水由浅水岸边结冰,在新生湖冰形成的过程中,可能会被强风或突然的升温打断(Kropáček等,2013)。为了避免这种偶然情况和湖岸边混合像元的影响,一些学者将湖冰面积占湖泊面积比例超过5%时刻定义为开始冻结时间,湖冰面积占湖泊面积95%时刻定义为完全冻结时间(Kropáček等,2013)。还有一些学者将该阈值分别调整至10%和90%(姚晓军等,2015)。提取湖冰物候信息首先是确定遥感数据源,结冰时湖冰范围每天都在变化,同时云层遮挡也会对湖冰物候监测产生一定的影响,因此研究要求高时间分辨率的遥感数据源,影像去云及填充是数据预处理的关键步骤。可以结合同一天的其他遥感数据源或上下期影像对被云层覆盖的范围进行判断(Gafurov和Bárdossy,2009):对于像素A,如果在同期的其他遥感数据中是水体(或其他类型如冰,下同),则该影像中像素A可确定为被水覆盖;如果日期 t 的一个像素A被云覆盖,则通过上一期及下一期影像判断,若上下2期

都被水覆盖, 则确定日期 t 的A像素被水覆盖。再利用3.1节中介绍的湖冰识别方法提取湖冰信息, 确定湖冰面积, 计算湖冰占湖泊总面积的比值 K , 绘制该年份 K 值曲线, 阈值线与 K 值曲线的交点即为物候信息的时间节点。

湖冰物候监测方法可基于不同的数据源: 光学遥感数据中MODIS传感器数据因其每日的重访周期而最为常用, 辅以高空间分辨率的影像数据来验证提取的准确性(邵雪楠等, 2022); 微波遥感数据如微波亮温数据通常生成时间序列, 通过阈值法在时间序列上提取湖冰物候(Gou等, 2017), 如滑动 t 检验MTT(Moving T Test)阈值法可以有效的提取湖冰物候信息(Du等, 2017), 检查时间序列上的每个点前后一段时间内的亮温数据是否有显著差异, 获取突变点作为判断湖冰变化情况的依据; 已有的冰雪产品可以直接计算湖冰面积变化; Du等(2017)基于AMSR-E和AMSR2建立了2002年—2015年北半球湖冰物候数据集, 利用此数据集也可获得湖冰物候信息。

3.3 湖冰冰厚遥感监测

湖冰厚度和对应冰期时间呈正相关关系, 即冰期越长, 湖冰越厚。与湖冰物候研究相比, 湖冰厚度研究较少, 且以海冰和河冰冰厚研究为主, 但其遥感监测方法可相互借鉴。湖冰冰厚监测主要采用微波遥感数据, 其测算湖冰厚度主要可以归结为3个方法:

(1) 利用湖泊的冰热信息, 结合能量平衡方程或经验关系模型构建湖冰模型, 可用于湖冰物候提取及冰厚模拟(Nakamura等, 2009; Wang等, 2010)。遥感平台为湖冰模型提供气温、降水、云量等输入数据。湖冰经验模型基于能量收支平衡, 即太阳短波辐射经历冰层表面反射, 在冰内传输过程中被吸收和散射, 最后透射入冰层下的水体(刘煜和吴辉碇, 2018)的过程, 发展了如CLIMo(Canadian Lake Ice Model)模型、HIGHTSI(High Resolution Thermodynamic Snow and Ice Model)模型、LIMNOS(Lake Ice Model Numerical Operational Simulator)模型等。CLIMo模型应用较为广泛(Dibike等, 2012), 模拟了在不同的环境条件下的湖冰生消过程, 模型的输入参数包括气温、相对湿度、风速、云量和降雪量等环境因素, 输出参数除能量平衡各组成要素外,

还包括湖冰物候信息和湖冰厚度等(Duguay等, 2003)。HIGHTSI模型更多地应用于计算高纬度湖泊的湖冰生消过程(曹晓卫, 2021)。模型法对云和雪很敏感, 因为云会阻挡热辐射, 雪则对其覆盖下层的冰起到绝缘的作用(Zeng等, 2016), 从而影响冰厚监测结果。

(2) 雷达(Nakamura等, 2009; Hvidegaard和Forsberg, 2002)和激光测高仪(Kwok和Cunningham, 2008)利用穿透效应反演湖冰厚度。利用波形来识别来自冰面和水面的信号, 即识别波形中的两峰值(图5), 计算出两个信号之间的时间差, 结合微波在冰中的传播速度计算出冰厚(Beckers等, 2017)。目前, Jason-1/2/3卫星作为TOPEX/Poseidon(T/P)卫星的后续任务, 有时间跨度长(联合T/P卫星长达30年)、重访时间短(10 d)以及反演精度高(2.0—4.2 cm)等优势, 在长时序、高时间分辨率监测湖泊冰厚方面有效(Li等, 2022)。但积雪覆盖是这种方法反演冰厚的最大的不确定性源。由于积雪的深度, 这种不确定性可能导致冰厚反演结果误差达到1 m(Kwok等, 2004)。

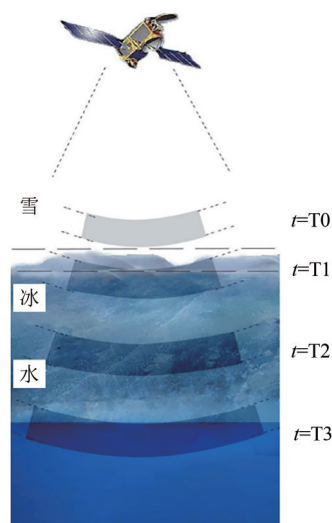
(3) 由于湖冰改变了原本微波信号的传输, 随着冰厚增加, 后向散射系数(Nakamura等, 2009)和亮温值(Lemmetyinen等, 2009)增加。针对特定湖泊, 可结合实测冰厚与同步观测的遥感卫星信号的后向散射系数(Leconte等, 2009)或亮温值(Murfit和Duguay, 2021)建立统计拟合模型, 常用的拟合方式有线性、指数、对数和幂函数拟合。但这种统计模型方法不具有普适性, 特定湖泊建立的统计模型难以推广到其他湖泊或区域尺度。

4 湖冰研究热点区域

为进一步探究全球湖冰遥感监测研究的趋势和热点, 本文在“Web of Science”核心数据集内, 按照检索式((TS=(phenology) OR TS=(thick*)) AND TS=(“lake ice”) AND (TS=(trend*) OR TS=(change*)))进行检索, 共计有237篇文章, 经过筛选, 保留了123篇与湖冰物候、厚度变化趋势高度相关的文章进行后续分析。湖冰的研究热点主要分布在北半球(121篇), 尤其是北美(45篇)、北欧(32篇)及青藏高原地区(24篇)。全球超过一

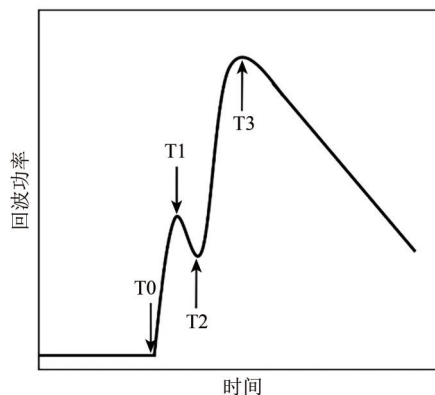
半的湖泊分布在北半球,且在北美和北欧存在大面积的湖泊群(吕哲敏,2021),因此北半球湖冰观测比较系统全面:北美的苏必利尔湖、大奴湖、北欧的卡尔湖、奥卢湖以及青藏高原地区的纳木

错等湖泊的相关文章数量均在10篇及以上。南半球的湖泊相对较少且存在结冰期的湖泊大多分布在南极地区,以实地监测为主(雷瑞波等,2011)。



(a) 雷达脉冲穿透湖冰示意图

(a) A diagram of radar pulse transmitting lake ice



(b) 回波功率的时间函数

(b) Temporal function of the received echo power

图5 基于卫星测高法反演湖冰冰厚示意图(Li等,2022)

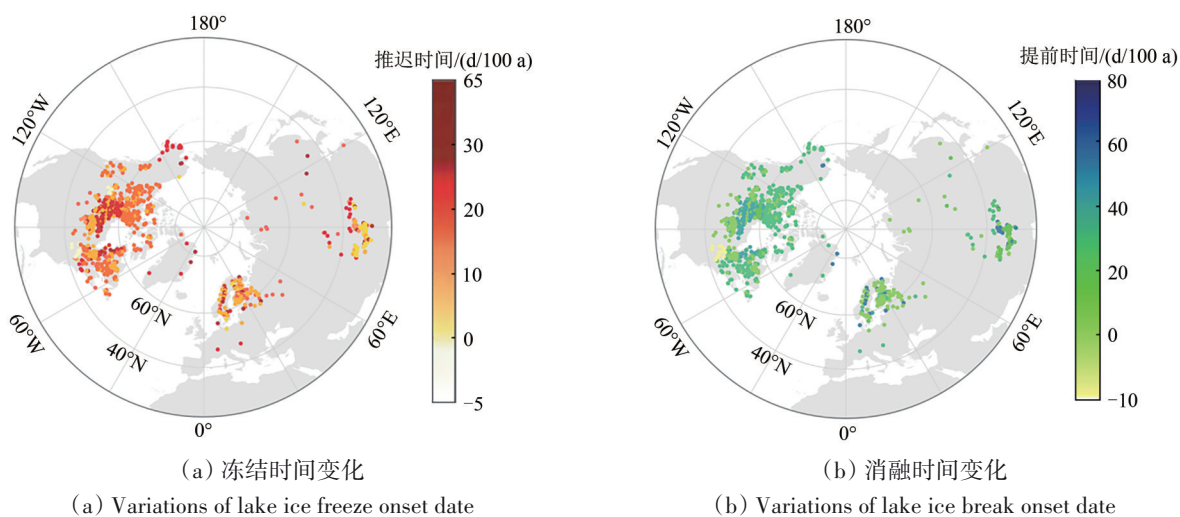
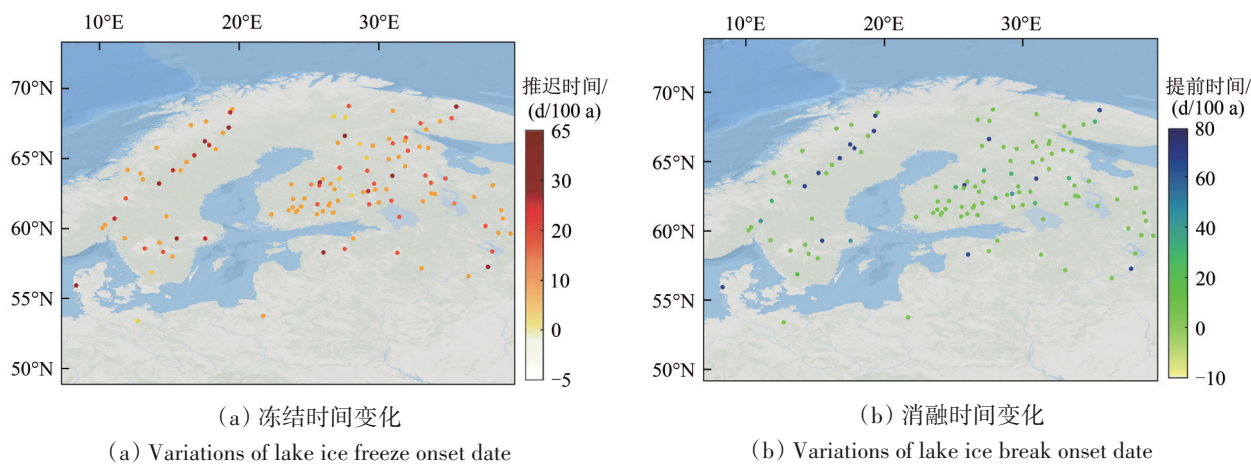
Fig. 5 A diagram of lake ice thickness measured by satellite altimetry method (Li et al., 2022)

4.1 热点区域湖冰变化情况

随着气候变暖,全球湖泊整体呈现冻结时间推迟、消融时间提前、冰期缩短、冰厚减薄的趋势。我们对前文中检索的相关SCI文章的研究结果进行了总结并合成了北半球湖冰物候变化时空特征分布图(图6),可见:1850年—2000年,北半球湖冰开始冻结时间平均每100年延迟5.8 d,开始消融时间平均每100年提前6.5 d(Magnuson等,2000)。位于北温带的湖泊的结冰率已由1980年的61%降至2020年的43%(Wang等,2021),且这个下降趋势还将持续。据相关研究预测,未来40年(2040年—2079年)内,北半球湖冰冻结日将推迟5—20 d,消融日将提前约10—30 d,从而导致湖冰冰期整体减少约15—50 d,湖冰的最大厚度也将减少10—50 cm(Dibike等,2011)。考虑到研究的年份、数据源和湖泊对象等因素不同,不同学者得出的湖冰物候的变化速率结论也不尽相同:对于北半球60个有超过百年实测记录(107—204年)的湖泊,数据显示,湖泊开始冻结时间平均每100年晚11.0 d,开始消融时间平均每100年早

6.8 d(Sharma等,2021);北半球 $>625\text{ km}^2$ 的湖泊在1979年—2018年开始冻结时间推迟约23 d/100 a,开始消融时间提前约17 d/100 a(Su等,2021)。

图7展示了北欧地区 100 km^2 以上湖泊的湖冰冻结时间和消融时间变化情况。该地区的湖冰研究集中在芬兰、瑞典、波兰3国。北欧地区湖泊的冰损失显著,结冰率由1980年的50%降至2020年的24%(Wang等,2021);1960年—2000年,芬兰北部、中部、南部地区湖泊冻结日推迟速率分别为4.6 d/100 a、3.6 d/100 a、7.9 d/100 a,消融日呈现提前速率分别为7.5 d/100 a、6.6 d/100 a、8.6 d/100 a(Korhonen,2006)。对瑞典地区54个湖泊湖冰冰期进行长时间(1960年—1990年)分析,有47个湖泊的消融日显著提前,速率在3—96 d/100 a之间(Weyhenmeyer等,2005)。波兰地区的18个在1961年—2010年有监测数据的湖泊在这50年间开始结冰时间推迟约23 d/100 a,完全消融时间提前了约43 d/100 a,冰期时长减少了约56 d/100 a(Choiński等,2015),Lake Morskie Oko的冻结日在40年内(1971年—2010年)推迟约41 d/100 a(Pociask-Karteczka和Choiński,2012)。

图6 北半球100 km²以上湖泊湖冰冻结时间与消融时间变化Fig. 6 Lake ice freeze onset date and break onset date variations of lakes larger than 100 km² in Northern Hemisphere图7 北欧100 km²以上湖泊的湖冰冻结时间和消融时间变化情况Fig. 7 Lake ice freeze onset date and break onset date variations of lakes larger than 100 km² in Northern Europe

北美地区的湖冰研究集中于加拿大、五大湖附近及阿拉斯加等地(图8)。加拿大北极群岛的许多湖泊每年有超过10个月被冰覆盖,基于AVHRR数据设定反射率阈值提取湖冰物候,1985年—2004年加拿大近北极地区开始冻结时间平均延迟约12 d/100 a,开始消融时间平均提前约18 d/100 a(Latifovic和Pouliot, 2007),冰厚减少10—30 cm(Dibike等, 2012),常年封冻的湖泊减少,转型为季节封冻(Surdu等, 2016)。加拿大地区的Great Bear Lake和Great Slave Lake湖冰监测比较完善,对这两个湖在2000年—2006年的湖冰物候进行时间序列分析,发现Great Bear Lake的冰期由2000年的247 d降至2006年的218 d, Great Slave Lake冰期也由193 d降至183 d(Howell等,

2009)。阿拉斯加北部地区湖泊在冬季结冰的数量也在减少,湖冰多呈现浮冰状,1991年—2011年,冻结日晚了5.9 d,消融日提前了17.7—18.6 d,冰期减少了约24 d(Surdu等, 2014)。模拟研究结果显示,在2041年—2070年,这种趋势还将继续,无积雪时平均最大冰厚将减少10—60 cm,有积雪时平均最大冰厚将减少5—50 cm(Brown和Duguay, 2011b)。

青藏高原也同样出现湖冰冰期缩短的现象(图9)。青藏高原湖泊冰期平均在176 d左右,完全封冻期130 d左右;由于气候的区域差异,高原北部湖区比南部湖区开始冻结期早、完全融化期晚、完全封冻期长(王智颖等, 2017)。表2列举了前人研究中青藏高原典型湖泊的湖冰变化趋势。

考虑到所用的遥感数据源、研究年份不同, 不同学者对同一湖泊的湖冰变化速率有不同的结论: 以纳木错为例, Guo等(2020)建立湖泊表面温度模型, 研究1978年—2017年纳木错的湖冰物候, 得出开始冻结时间平均每百年延迟约57 d, 开始消融时间平均每100年提前约23 d的结论; Gou等(2017)对MODIS地表反射率、地表温度和冰雪覆盖数据值设定阈值, 纳木错2000年—2015年开始冻结时间平均每100年延迟约58 d, 开始消融时间平均每100年提前约9 d; Ke等(2013)通过多阈值法, 利用被动微波数据和MODIS数据, 认为纳

木错1979年—2013年开始冻结时间延迟9 d, 开始消融时间提前10 d, 即开始冻结时间平均每100年延迟约26 d, 开始消融时间平均每100年提前约29 d。尽管不同研究对于湖泊湖冰物候时间变化幅度表现较大的差异, 但均一致地表明其开始冻结时间延迟、开始消融时间提前的特征。目前, 关于青藏高原湖冰厚度的研究较少, 但可以确定的是随着温度的升高, 青藏高原湖冰冰厚也有减薄的趋势(陈贤章等, 1995; Lang等, 2021)。

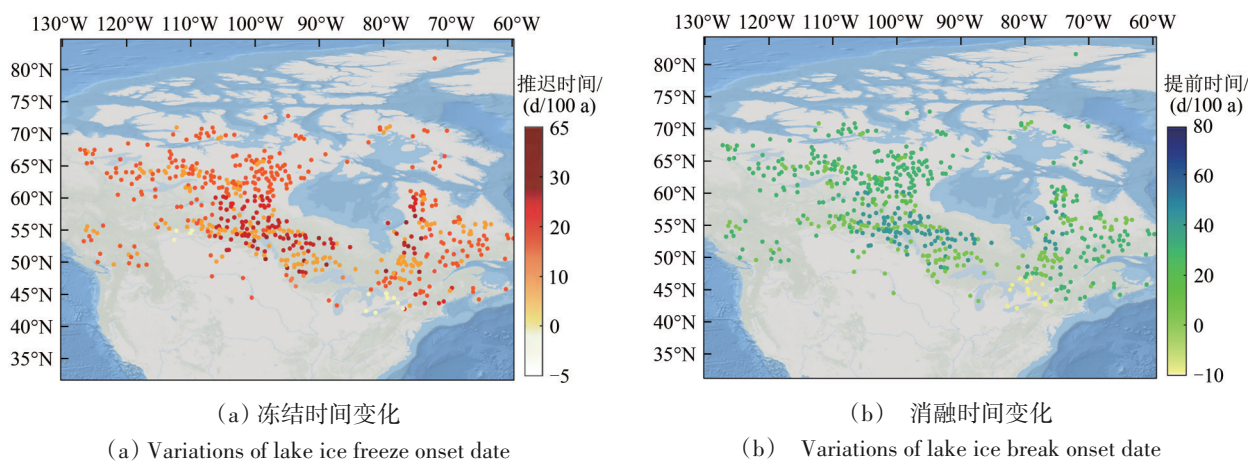


图8 北美100 km²以上湖泊湖冰冻结时间和消融时间变化情况

Fig. 8 Lake ice freeze onset date and break onset date variations of lakes larger than 100 km² in North America

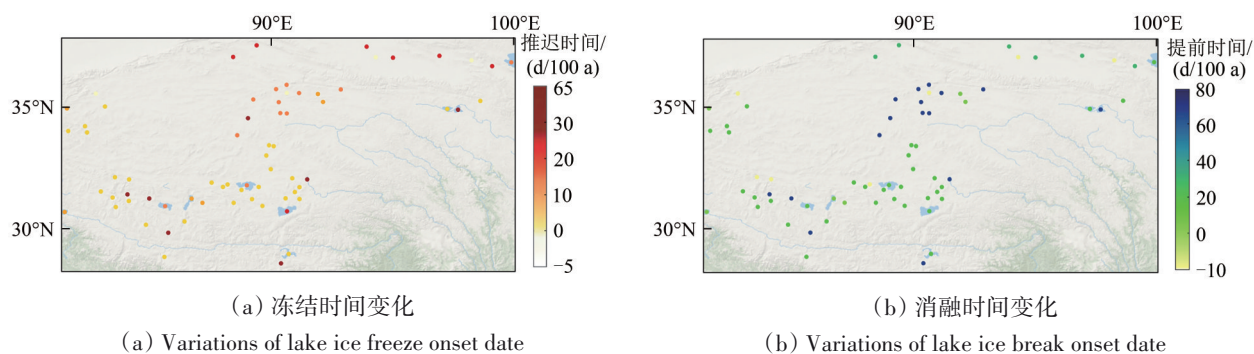


图9 青藏高原100 km²以上湖泊湖冰冻结时间和消融时间变化情况

Fig. 9 Lake ice freeze onset date and break onset date variations of lakes larger than 100 km² in Qinghai-Tibet Plateau

4.2 湖冰变化影响因素

现有研究一致表明: 气温是影响湖冰物候的最重要因素(Leppäranta, 2014; Kouraev等, 2007a; Caldwell等, 2021)。美国中西部、东部和欧洲中部的湖冰受全球变暖的影响, 冰期缩短的趋势显著(Sharma等, 2021)。基于青藏高原地区湖冰研

究结果, 如果气温升高2 °C, 冻结日期平均将推迟7.3 d, 消融日期平均提前12.4 d, 冰期显著缩短, 平均缩短19.7 d(吴艳红等, 2022)。

风速、积雪量等气候因素对湖冰生消也有重要影响。风会加速湖面气流运动和水动力作用, 带走湖冰形成时所产生的潜热, 较大的风速会使

得薄冰破裂, 在初冰期和破冰期时, 加速湖冰消融。积雪覆盖在湖冰上, 反射部分太阳辐射的同时也隔绝了湖冰与大气的部分热传递, 起到一定的保温作用, 减缓湖冰消融速率。在湖冰生长初期, 湖泊表面温度随着气温的下降而下降, 湖水由湖岸边开始冻结, 此时的湖冰较薄且不稳定, 当风速增大时, 新生湖冰易破裂 (王智颖等, 2017)。湖冰进入稳定增长后期后, 冰厚往往由气温和积雪量决定 (Tedesco等, 2014), 湖冰厚度随积雪量的增长而增长 (Brown和Duguay, 2010), 湖冰消融时间因此变晚 (Nöges和Nöges, 2014; Brown和Duguay, 2011a)。

表2 青藏高原典型湖泊的湖冰物候变化趋势

Table 2 Ice phenology variations in typical lakes on the Tibetan Plateau

湖泊名称	冻结时间延迟速率(d/100 a)	消融时间提前速率(d/100 a)	参考文献
青海湖	16	36	(Qi等, 2020)
	16	37	(Liu等, 2019)
	16	6	(Cai等, 2017)
纳木错	57	23	(Guo等, 2020)
	58	9	(Gou等, 2017)
	26	29	(Ke等, 2013)
色林错	113	22	(邵雪楠等, 2022)

湖冰物候及厚度的变化也与湖泊自身属性有关, 如湖泊面积、形状、水深、湖水透明度、盐度、矿化度等 (Cai等, 2019), 咸水湖的湖冰物候变化较淡水湖更大 (王智颖等, 2017)。在高纬度地区, 湖冰变化也与源自太平洋和大西洋的主要大气环流有关, 如南方涛动、太平洋北美涛动、北大西洋涛动等 (Ghanbari等, 2009), 这些大气环流对温度和降雪的产生影响, 进而影响湖冰物候及厚度。

5 结 语

湖冰变化是气候变化的映射, 越来越多的学者聚焦于湖冰研究。多源遥感观测为湖冰研究提供了大规模、长时序、高时间分辨率的数据, 为湖冰监测提供了便利, 促进了对于全球湖冰物候、冰厚在过去近半个世纪变化规律的掌握。湖冰遥感监测研究多关注于湖冰物候、冰厚变化趋势等方面, 取得了显著的研究进展。

湖冰在冻结期间变化表现出高时频的特征,

因此需要高时间分辨率的遥感数据。MODIS传感器数据及被动微波遥感数据因其每日重访的周期被广泛应用于湖冰监测, 但受限于其较低的空间分辨率。当前的湖冰研究主要集中于大型湖泊, 对中小型湖泊的关注有限, 如何结合中高分辨率卫星数据, 利用其空间分辨率上的优势, 提高湖泊湖冰观测的精度是未来研究重点方向之一。

另外, 已有的研究更多着眼于已发生的变化, 限于卫星服役年限而无法构建长时序的湖冰信息, 缺少对过去遥感技术未兴起时期的湖冰冰情评估, 且对未来湖冰变化特征的预测还不充分。随着大数据和人工智能等技术的不断发展, 利用遥感大数据和机器/深度学习方法的湖冰遥感监测方法, 实现湖冰物候、厚度信息的历史长时序重建与未来变化特征预测是十分关键的研究突破口。

目前, 湖冰监测研究集中于北美、北欧地区。青藏高原地区湖冰对气候变化的响应十分敏感, 但由于海拔高、地形复杂、通达性差、中小型湖泊数量多等特征, 加之国内遥感起步发展相对较晚等原因, 青藏高原地区的湖冰研究还不充分, 适合该地区的方法与模型和对其他属性如冰厚研究尚处于探索阶段。青藏高原的湖冰物候变化是高山区气候变化的缩影, 认识该地区湖冰变化的过去、现在及未来对研究全球气候变化有重要的指示意义, 该地区是湖冰研究未来亟需关注的重点区域。

随着气候变暖, 全球湖泊整体呈现冻结时间推迟、消融时间提前、冰期缩短、冰厚减薄等趋势特征, 势必引发湖泊物理水文、水化学及生态系统的系列连锁反应, 进而对流域自然与人居环境造成胁迫, 应对措施刻不容缓。遥感只是用来观测其变化的工具, 反思气候变化并采取行动才是湖冰遥感监测的意义所在和当务之急。

参考文献 (References)

- Arcone S A and Delaney A J. 1987. Airborne river-ice thickness profiling with helicopter-borne UHF short-pulse radar. *Journal of Glaciology*, 33(115): 330-340 [DOI: 10.3189/S002214300008923]
- Beckers J F, Casey J A and Haas C. 2017. Retrievals of lake ice thickness from Great Slave Lake and Great Bear Lake using CryoSat-2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(7): 3708-3720 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2677583]
- Brown L C and Duguay C R. 2010. The response and role of ice cover

- in lake-climate interactions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 34(5): 671-704 [DOI: 10.1177/0309133310375653]
- Brown L C and Duguay C R. 2011a. A comparison of simulated and measured lake ice thickness using a Shallow Water Ice Profiler. *Hydrological Processes*, 25(19): 2932-2941 [DOI: 10.1002/hyp.8087]
- Brown L C and Duguay C R. 2011b. The fate of lake ice in the North American Arctic. *The Cryosphere*, 5(4): 869-892 [DOI: 10.5194/tc-5-869-2011]
- Brown L C and Duguay C R. 2012. Modelling lake ice phenology with an examination of satellite-detected subgrid cell variability. *Advances in Meteorology*, 2012: 529064 [DOI: 10.1155/2012/529064]
- Cai Y, Ke C Q and Duan Z. 2017. Monitoring ice variations in Qinghai Lake from 1979 to 2016 using passive microwave remote sensing data. *Science of the Total Environment*, 607-608: 120-131 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.027]
- Cai Y, Ke C Q, Li X G, Zhang G Q, Duan Z and Lee H. 2019. Variations of lake ice phenology on the Tibetan Plateau from 2001 to 2017 based on MODIS data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(2): 825-843 [DOI: 10.1029/2018jd028993]
- Caldwell T J, Chandra S, Albright T P, Harpold A A, Dilts T E, Greenberg J A, Sadro S and Dettinger M D. 2021. Drivers and projections of ice phenology in mountain lakes in the western United States. *Limnology and Oceanography*, 66(3): 995-1008 [DOI: 10.1002/lno.11656]
- Cao M S. 2006. *Remote Sensing of Cryosphere*. Beijing: Science Press (曹梅盛. 2006. 冰冻圈遥感. 北京: 科学出版社)
- Cao X W. 2021. *Observation and Simulation Research on Growth and Decay Processes of Ice Cover on Lake Wuliangsuhei*. Dalian: Dalian University of Technology (曹晓卫. 2021. 乌梁素海湖冰生消过程观测与模拟研究. 大连博士: 大连理工大学) [DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.003856]
- Cavalieri D J, Crawford J P, Drinkwater M R, Eppler D T, Farmer L D, Jentz R R and Wackerman C C. 1991. Aircraft active and passive microwave validation of sea ice concentration from the Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C12): 21989-22008 [DOI: 10.1029/91jc02335]
- Chen X Z, Wang G Y, Li W J, Zeng Q Z, Jin D H and Wang L H. 1995. Lake ice and its remote sensing monitoring in the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 17(3): 241-246 (陈贤章, 王光宇, 李文君, 曾群柱, 金德洪, 王丽红. 1995. 青藏高原湖冰及其遥感监测. 冰川冻土, 17(3): 241-246)
- Choiński A, Ptak M, Skowron R and Strzelczak A. 2015. Changes in ice phenology on Polish lakes from 1961 to 2010 related to location and morphometry. *Limnologica*, 53: 42-49 [DOI: 10.1016/j.limno.2015.05.005]
- Créteaux J F, Merchant C J, Duguay C, Simis S, Calmettes B, Bergé-Nguyen M, Wu Y, Zhang D, Carrea L, Liu X, Selmes N and Warren M. 2020. ESA Lakes Climate Change Initiative (Lakes_cci): lake products, Version 1.0. Centre for Environmental Data Analysis [DOI: 10.5285/3c324bb4ee394d0d876fe2e1db217378]
- Dauginis A A and Brown L C. 2021. Recent changes in Pan-Arctic sea ice, lake ice, and snow-on/off timing. *The Cryosphere*, 15(10): 4781-4805 [DOI: 10.5194/tc-15-4781-2021]
- Dibike Y, Prowse T, Bonsal B, Rham L D and Saloranta T. 2012. Simulation of North American lake-ice cover characteristics under contemporary and future climate conditions. *International Journal of Climatology*, 32(5): 695-709 [DOI: 10.1002/joc.2300]
- Dibike Y, Prowse T, Saloranta T and Ahmed R. 2011. Response of Northern Hemisphere lake-ice cover and lake-water thermal structure patterns to a changing climate. *Hydrological Processes*, 25(19): 2942-2953 [DOI: 10.1002/hyp.8068]
- Du J Y, Kimball J S, Duguay C, Kim Y and Watts J D. 2017. Satellite microwave assessment of northern hemisphere lake ice phenology from 2002 to 2015. *The Cryosphere*, 11(1): 47-63 [DOI: 10.5194/tc-11-47-2017]
- Duguay C R, Bernier M, Gauthier Y and Kouraev A. 2015. Remote sensing of lake and river ice//Tedesco M, ed. *Remote Sensing of the Cryosphere*. New York: John Wiley and Sons: 273-306 [DOI: 10.1002/9781118368909.ch12]
- Duguay C R, Flato G M, Jeffries M O, Ménard P, Morris K and Rouse W R. 2003. Ice-cover variability on shallow lakes at high latitudes: model simulations and observations. *Hydrological Processes*, 17(17): 3465-3483 [DOI: 10.1002/hyp.1394]
- Gafurov A and Bárdossy A. 2009. Cloud removal methodology from MODIS snow cover product. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7): 1361-1373 [DOI: 10.5194/hess-13-1361-2009]
- Gatto L W. 1990. Monitoring river ice with landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 32(1): 1-16 [DOI: 10.1016/0034-4257(90)90094-3]
- Geldsetzer T, van der Sanden J and Brisco B. 2010. Monitoring lake ice during spring melt using RADARSAT-2 SAR. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(S2): S391-S400 [DOI: 10.5589/m11-001]
- Ghanbari R N, Bravo H R, Magnuson J J, Hyzer W G and Benson B J. 2009. Coherence between lake ice cover, local climate and teleconnections (Lake Mendota, Wisconsin). *Journal of Hydrology*, 374(3/4): 282-293 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.024]
- Gherboudj I, Bernier M and Leconte R. 2010. A backscatter modeling for river ice: analysis and numerical results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(4): 1788-1798 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2034256]
- Gou P, Ye Q H, Che T, Feng Q, Ding B H, Lin C G and Zong J B. 2017. Lake ice phenology of Nam Co, Central Tibetan Plateau, China, derived from multiple MODIS data products. *Journal of Great Lakes Research*, 43(6): 989-998 [DOI: 10.1016/j.jglr.2017.08.011]
- Gou P, Ye Q H and Wei Q F. 2015. Lake ice change at the Nam Co Lake on the Tibetan Plateau during 2000-2013 and influencing factors. *Progress in Geography*, 34(10): 1241-1249 (勾鹏, 叶庆

- 华, 魏秋方. 2015. 2000-2013年西藏纳木错湖冰变化及其影响因素. 地理科学进展, 34(10): 1241-1249 [DOI: 10.18306/dlxxjz.2015.10.004]
- Guo L N, Zheng H X, Wu Y H, Zhang T Q, Wen M X, Fan L X and Zhang B. 2020. Responses of lake ice phenology to climate change at Tibetan Plateau. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13: 3856-3861 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3006270]
- Hall D K, Fagre D B, Klasner F, Linebaugh G and Liston G E. 1994. Analysis of ERS 1 synthetic aperture radar data of frozen lakes in northern Montana and implications for climate studies. Journal of Geophysical Research: Oceans, 99(C11): 22473-22482 [DOI: 10.1029/94JC01391]
- Hall D K and Riggs G A. 2007. Accuracy assessment of the MODIS snow products. Hydrological Processes, 21(12): 1534-1547 [DOI: 10.1002/hyp.6715]
- Hall D K, Riggs G A and Salomonson V V. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. Remote Sensing of Environment, 54(2): 127-140 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00137-P]
- Han W X, Huang C L, Duan H T, Gu J and Hou J L. 2020. Lake Phenology of freeze-thaw cycles using random forest: a case study of Qinghai Lake. Remote Sensing, 12(24): 4098 [DOI: 10.3390/rs12244098]
- Hodgkins G A. 2013. The importance of record length in estimating the magnitude of climatic changes: an example using 175 years of lake ice-out dates in New England. Climatic Change, 119(3): 705-718 [DOI: 10.1007/s10584-013-0766-8]
- Howell S E L, Brown L C, Kang K K and Duguay C R. 2009. Variability in ice phenology on Great Bear Lake and Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada, from SeaWinds/QuikSCAT: 2000 - 2006. Remote Sensing of Environment, 113(4): 816-834 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.12.007]
- Huang X D, Li X B, Liu C Y, Zhou M Q and Wang J S. 2019. Remote sensing inversion of snow cover extent and snow depth/snow water equivalent on the Qinghai-Tibet Plateau: advance and challenge. Journal of Glaciology and Geocryology, 41(5): 1138-1149 (黄晓东, 李旭冰, 刘畅宇, 周敏强, 王健顺. 2019. 青藏高原积雪范围和雪深/雪水当量遥感反演研究进展及挑战. 冰川冻土, 41(5): 1138-1149) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0529]
- Hvidegaard S M and Forsberg R. 2002. Sea-ice thickness from airborne laser altimetry over the Arctic Ocean north of Greenland. Geophysical Research Letters, 29(20): 1952 [DOI: 10.1029/2001GL014474]
- Jia W, Wang J A, Shi P J and Ma W D. 2021. The progress and prospect of remote sensing monitoring of rocky desert dynamic changes in the ice and snow melting area of the Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Geo-Information Science, 23(10): 1715-1727 (贾伟, 王静爱, 史培军, 马伟东. 2021. 青藏高原冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测研究现状与展望. 地球信息科学学报, 23(10): 1715-1727) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2021.210149]
- 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 的尕海冰厚监测. 兰州: 西北师范大学) [DOI: 10.27410/d.cnki.gxbfu.2021.001779]
- Johannessen O M, Campbell W J, Shuchman R, Sandven S, Gloersen P, Johannessen J A, Josberger E G and Haugan P M. 1992. Microwave study programs of air-ice-ocean interactive processes in the seasonal ice zone of the Greenland and Barents seas//Carsey F D, ed. Microwave Remote Sensing of Sea Ice, Volume 68. Washington: American Geophysical Union: 261-289 [DOI: 10.1029/GM068p0261]
- Johnson S L and Stefan H G. 2006. Indicators of climate warming in Minnesota: lake ICE covers and snowmelt runoff. Climatic Change, 75(4): 421-453 [DOI: 10.1007/s10584-006-0356-0]
- Kang K K, Duguay C R, Lemmetyinen J and Gel Y. 2014. Estimation of ice thickness on large northern lakes from AMSR-E brightness temperature measurements. Remote Sensing of Environment, 150: 1-19 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.016]
- Ke C Q, Tao A Q and Jin X. 2013. Variability in the ice phenology of Nam Co Lake in central Tibet from scanning multichannel microwave radiometer and special sensor microwave/imager: 1978 to 2013. Journal of Applied Remote Sensing, 7(1): 073477 [DOI: 10.1117/1.JRS.7.073477]
- Korhonen J. 2006. Long-term changes in lake ice cover in Finland. Hydrology Research, 37(4/5): 347-363 [DOI: 10.2166/nh.2006.019]
- Kouraev A V, Kostianoy A G and Lebedev S A. 2009. Ice cover and sea level of the Aral Sea from satellite altimetry and radiometry (1992-2006). Journal of Marine Systems, 76(3): 272-286 [DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.03.016]
- Kouraev A V, Semovski S V, Shimaraev M N, Mognard N M, Legrésy B and Rémy F. 2007a. The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data: relationship to air temperature, dynamical, and other factors. Limnology and Oceanography, 52(3): 1268-1286 [DOI: 10.4319/lo.2007.52.3.1268]
- Kouraev A V, Semovski S V, Shimaraev M N, Mognard N M, Legrésy B and Remy F. 2007b. Observations of Lake Baikal ice from satellite altimetry and radiometry. Remote Sensing of Environment, 108(3): 240-253 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.010]
- Kropáček J, Maussion F, Chen F, Hoerz S and Hochschild V. 2013. Analysis of ice phenology of lakes on the Tibetan Plateau from MODIS data. The Cryosphere, 7(1): 287-301 [DOI: 10.5194/tc-7-287-2013]
- Kuusisto E. 1994. The thickness and volume of lake ice in Finland. National Board of Waters and the Environment
- Kwok R and Cunningham G F. 2008. ICESat over Arctic sea ice: estimation of snow depth and ice thickness. Journal of Geophysical Research: Oceans, 113(C8): C08010 [DOI: 10.1029/2008JC004753]
- Kwok R, Zwally H J and Yi D H. 2004. ICESat observations of Arctic sea ice: a first look. Geophysical Research Letters, 31(16):

- L16401 [DOI: 10.1029/2004GL020309]
- Lang J H, Ma Y M, Li Z G and Su D S. 2021. The impact of climate warming on lake surface heat exchange and ice phenology of different types of lakes on the Tibetan Plateau. *Water*, 13(5): 634 [DOI: 10.3390/w13050634]
- Latifovic R and Pouliot D. 2007. Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record. *Remote Sensing of Environment*, 106(4): 492-507 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.015]
- Leconte R, Daly S, Gauthier Y, Yankielun N, Bérubé F and Bernier M. 2009. A controlled experiment to retrieve freshwater ice characteristics from an FM-CW radar system. *Cold Regions Science and Technology*, 55(2): 212-220 [DOI: 10.1016/j.coldregions.2008.04.003]
- Lei R B, Li Z J, Zhang Z H and Cheng Y F. 2011. Comparisons of thermodynamic processes between lake ice and landfast sea ice around Zhongshan Station, East Antarctica. *Chinese Journal of Polar Research*, 23(4): 289-298 (雷瑞波, 李志军, 张占海, 程言峰. 2011. 东南极中山站附近湖冰与固定冰热力学过程比较. *极地研究*, 23(4): 289-298) [DOI: 10.3724/SP.J.1084.2011.00289]
- Lemmetyinen J, Derksen C, Pulliainen J, Strapp W, Toose P, Walker A, Tauriainen S, Pihlflyckt J, Karna J P and Hallikainen M T. 2009. A comparison of airborne microwave brightness temperatures and snowpack properties across the boreal forests of Finland and western Canada. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(3): 965-978 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2006358]
- Lemmetyinen J, Kontu A, Kärnä J P, Vehviläinen J, Takala M and Pulliainen J. 2011. Correcting for the influence of frozen lakes in satellite microwave radiometer observations through application of a microwave emission model. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3695-3706 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.008]
- Leppäranta M. 2014. Interpretation of statistics of lake ice time series for climate variability. *Hydrology Research*, 45(4/5): 673-683 [DOI: 10.2166/nh.2013.246]
- Li X D, Long D, Huang Q and Zhao F Y. 2022. 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 Z J, Han M, Qin J M, Xi Y Z and Lu P. 2005. States and advances in monitor of ice thickness change. *Advances in Water Science*, 16(5): 753-757 (李志军, 韩明, 秦建敏, 郝玉珠, 卢鹏. 2005. 冰厚变化的现场监测现状和研究进展. *水科学进展*, 16(5): 753-757) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2005.05.025]
- Lillesand T M, Kiefer R W and Chipman J W. 2015. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7th ed. Hoboken: John Wiley and Sons
- 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 Technology*, 18(3): 217-224 (刘辉, 冀鸿兰, 牟献友, 郜国明, 张宝森. 2020. 基于无人机电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.nsbdqk.2020.0067]
- Liu Y, Chen H P, Wang H J and Qiu Y B. 2018. The impact of the NAO on the Delayed Break-up date of Lake Ice over the Southern Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 31(22): 9073-9086 [DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0197.1]
- Liu Y, Chen H P, Wang H J, Sun J Q, Li H and Qiu Y B. 2019. Modulation of the Kara sea ice variation on the ice freeze-up time in Lake Qinghai. *Journal of Climate*, 32(9): 2553-2568 [DOI: 10.1175/jcli-d-18-0636.1]
- Liu Y and Wu H D. 2018. Sea ice thermodynamics. *Marine Forecasts*, 35(3): 88-97 (刘煜, 吴辉斌. 2018. 第3讲 海冰热力学. *海洋预报*, 35(3): 88-97) [DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2018.03.011]
- Liu Z P, Fu H, Guo X L, Wang T and Cui H T. 2017. Double frequency radar system for ice thickness and water depth measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 48(11): 1341-1347 (刘之平, 付辉, 郭新蕾, 王涛, 崔海涛. 2017. 冰水情一体化双频雷达测量系统. *水利学报*, 48(11): 1341-1347) [DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170017]
- Lü Z M. 2021. Effects of Lake Processes on Regional and Global Climate Forecasts. Yangling: Northwest A&F University (吕哲敏. 2021. 湖泊过程对区域及全球气候预报的影响. 杨凌: 西北农林科技大学) [DOI: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.000016]
- Ma Z G, Liu Z H, Pu J B, Xu L L, Li K, Wangqu L L, Wu R, Ma Y Y, Chen Y and Duguay C. 2021. Deep convolutional neural network with random field model for lake ice mapping from Sentinel-1 imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 42(24): 9351-9375 [DOI: 10.1080/01431161.2021.1995074]
- Magnuson J J, Robertson D M, Benson B J, Wynne R H, Livingstone D M, Arai T, Assel R A, Barry R G, Card V, Kuusisto E, Granin N G, Prowse T D, Stewart K M and Vuglinski V S. 2000. Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere. *Science*, 289(5485): 1743-1746 [DOI: 10.1126/science.289.5485.1743]
- Marko J R and Jasek M. 2010. Sonar detection and measurement of ice in a freezing river II: observations and results on frazil ice. *Cold Regions Science and Technology*, 63(3): 135-153 [DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.05.003]
- Morris K, Jeffries M O and Weeks W F. 1995. Ice processes and growth history on Arctic and sub-Arctic lakes using ERS-1 SAR data. *Polar Record*, 31(177): 115-128 [DOI: 10.1017/S0032247400013619]
- Murfitt J and Brown L C. 2017. Lake ice and temperature trends for Ontario and Manitoba: 2001 to 2014. *Hydrological Processes*, 31(21): 3596-3609 [DOI: 10.1002/hyp.11295]
- Murfitt J and Duguay C R. 2021. 50 years of lake ice research from active microwave remote sensing: progress and prospects. *Remote Sensing of Environment*, 264: 112616 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112616]
- Nakamura K, Wakabayashi H, Uto S, Ushio S and Nishio F. 2009. Observation of sea-ice thickness using ENVISAT data from Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6(2): 277-281 [DOI: 10.1109/lgrs.2008.2011061]
- Nõges P and Nõges T. 2014. Weak trends in ice phenology of Estonian large lakes despite significant warming trends. *Hydrobiologia*, 731(1): 5-18 [DOI: 10.1007/s10750-013-1572-z]

- Nonaka T, Matsunaga T and Hoyano A. 2007. Estimating ice breakup dates on Eurasian lakes using water temperature trends and threshold surface temperatures derived from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 28(10): 2163-2179 [DOI: 10.1080/01431160500391957]
- Pang Y W, Huang Y X, Gong Z, Wen J Y and Xu J F. 2020. Advances in phenological monitoring of lake ice based on multi-spectral remote sensing. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (2): 90-99 (庞毓雯, 黄雨馨, 巩志, 问静怡, 徐俊锋. 2020. 基于多光谱遥感的湖冰物候监测方法研究进展. *海洋湖沼通报*, (2): 90-99) [DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2020.02.011]
- Pociask-Karteczka J and Choiński A. 2012. Recent trends in ice cover duration for Lake Morskie Oko (Tatra Mountains, East-Central Europe). *Hydrology Research*, 43(4): 500-506 [DOI: 10.2166/nh.2012.019]
- Qi M M, Liu S Y, Yao X J, Xie F M and Gao Y P. 2020. Monitoring the ice phenology of Qinghai Lake from 1980 to 2018 using multi-source remote sensing data and Google earth engine. *Remote Sensing*, 12(14): 2217 [DOI: 10.3390/rs12142217]
- Qi M M, Yao X J, Li X F and Gao Y P. 2018. A dataset of lake ice phenology in Qinghai Lake from 2000 to 2018. *China Scientific Data*, 3(4): 17-27 (祁苗苗, 姚晓军, 李晓锋, 高永鹏. 2018. 2000-2018年青海湖湖冰物候特征数据集. *中国科学数据(中英文网络版)*, 3(4): 17-27) [DOI: 10.11922/csdata.2018.0045.zh]
- Qu B, Kang S C, Chen F, Zhang Y J and Zhang G S. 2012. Lake ice and its effect factors in the Nam Co Basin, Tibetan Plateau. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 8(5): 327-333 (曲斌, 康世昌, 陈锋, 张拥军, 张国帅. 2012. 2006-2011年西藏纳木错湖冰状况及其影响因素分析. *气候变化研究进展*, 8(5): 327-333) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2012.05.003]
- Ramsay B H. 1998. The interactive multisensor snow and ice mapping system. *Hydrological Processes*, 12(10/11): 1537-1546 [DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1537::AID-HYP679>3.0.CO;2-A]
- Ruan Y J. 2017. *Passive Microwave Remote Sensing of Lake ice Freeze-Thaw Monitoring over High Asia*. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology (阮永俭. 2017. 被动微波高亚洲湖冰冻融监测研究. 赣州: 江西理工大学) [DOI: 10.7666/d.D01237698]
- Sharma S, Richardson D C, Woolway R I, Imrit M A, Bouffard D, Blagrave K, Daly J, Filazzola A, Granin N, Korhonen J, Magnuson J, Marszelewski W, Matsuzaki S I S, Perry W, Robertson D M, Rudstam L G, Weyhenmeyer G A and Yao H X. 2021. Loss of ice cover, shifting phenology, and more extreme events in northern hemisphere lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(10): e2021JG006348 [DOI: 10.1029/2021jg006348]
- Su L, Che T and Dai L Y. 2021. Variation in ice phenology of large lakes over the Northern Hemisphere based on passive microwave remote sensing data. *Remote Sensing*, 13(7): 1389 [DOI: 10.3390/rs13071389]
- Sun H, Li C H and Yao X J. 2021. Extraction and analysis of lake ice in typical lakes on the northern slopes of the Himalayas based on NPP-VIIRS data. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(1): 70-79 (孙皓, 李传华, 姚晓军. 2021. 基于NPP-VIIRS数据的喜马拉雅山北坡典型湖泊湖冰提取分析. *冰川冻土*, 43(1): 70-79) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0081]
- Surdu C M, Duguay C R, Brown L C and Prieto D F. 2014. Response of ice cover on shallow lakes of the North Slope of Alaska to contemporary climate conditions (1950 - 2011): radar remote-sensing and numerical modeling data analysis. *The Cryosphere*, 8(1): 167-180 [DOI: 10.5194/tc-8-167-2014]
- Surdu C M, Duguay C R and Prieto D F. 2016. Evidence of recent changes in the ice regime of lakes in the Canadian High Arctic from spaceborne satellite observations. *The Cryosphere*, 10(3): 941-960 [DOI: 10.5194/tc-10-941-2016]
- Tai X N, Wang N L, Wu Y W and Zhang Y J. 2022. Lake ice phenology variations and influencing factors of Selin Co from 2000 to 2020. *Journal of Lake Sciences*, 34(1): 334-348 (邵雪楠, 王宁练, 吴玉伟, 张玉杰. 2022. 近20 a色林错湖冰物候变化特征及其影响因素. *湖泊科学*, 34(1): 334-348) [DOI: 10.18307/2022.0127]
- Tedesco M, Derksen C, Deems J S and Foster J L. 2014. Remote sensing of snow depth and snow water equivalent//Tedesco M, ed. *Remote Sensing of the Cryosphere*. New York: John Wiley and Sons: 73-98 [DOI: 10.1002/9781118368909.ch5]
- Tekeli A E, Sönmez I and Erdi E. 2016. Snow-covered area determination based on satellite-derived probabilistic snow cover maps. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3): 198 [DOI: 10.1007/s12517-015-2149-0]
- Tom M, Aguilar R, Imhof P, Leinss S, Baltavias E and Schindler K. 2020. Lake ice detection from sentinel-1 SAR with deep learning. *arXiv preprint arXiv: 2002.07040* [DOI: 10.48550/arXiv.2002.07040]
- Verpoorter C, Kutser T, Seekell D A and Tranvik L J. 2014. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 41(18): 6396-6402 [DOI: 10.1002/2014gl060641]
- Wakabayashi H, Weeks W F and Jeffries M O. 1993. A C-band backscatter model for lake ice in ALASKA//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Tokyo: IEEE: 1264-1266 [DOI: 10.1109/IGARSS.1993.322103]
- Walker A E and Davey M R. 1993. Observation of Great Slave Lake ice freeze-up and break-up processes using passive microwave satellite data//Proceedings of the 16th Canadian Symposium on Remote Sensing, Sherbrooke, Quebec, Canada. 233-238
- Wang G X, Zhang T J, Yang R M, Zhong X Y and Li X D. 2020. Lake ice changes in the Third Pole and the Arctic. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 42(1): 124-139 (汪关信, 张廷军, 杨瑞敏, 钟歆玥, 李晓东. 2020. 从第三极到北极: 湖冰研究进展. *冰川冻土*, 42(1): 124-139) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0008]
- Wang Q, Wang J B, Guo J Y and Liang J. 2019. Lake ice extraction of Selin Co and its space-time distribution based on support vector machine. *Manned Spaceflight*, 25(6): 789-798 (王琼, 王君波, 郭

- 俊钰, 梁继. 2019. 基于支持向量机的色林错湖冰提取及时空分布. 载人航天, 25(6): 789-798 [DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2019.06.014]
- Wang X C, Feng L, Gibson L, Qi W, Liu J G, Zheng Y, Tang J, Zeng Z Z and Zheng C M. 2021. High-resolution mapping of ice cover changes in over 33, 000 lakes across the North Temperate Zone. *Geophysical Research Letters*, 48(18): e2021GL095614 [DOI: 10.1029/2021gl095614]
- Wang X J, Key J R and Liu Y H. 2010. A thermodynamic model for estimating sea and lake ice thickness with optical satellite data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12): C12035 [DOI: 10.1029/2009jc005857]
- Wang Z Y, Wu Y H, Chang J, Zhang X and Pei D L. 2017. Temporal and spatial variation of lake ice phenology and its influencing factors in the Tibetan Plateau. *Journal of Beijing University of Technology*, 43(5): 701-709 (王智颖, 吴艳红, 常军, 张鑫, 彭代亮. 2017. 青藏高原湖冰物候的时空变化及其影响因素. 北京工业大学学报, 43(5): 701-709) [DOI: 10.11936/bjtxb2016110002]
- Warne C P K, McCann K S, Rooney N, Cazelles K and Guzzo M M. 2020. Geography and morphology affect the ice duration dynamics of Northern Hemisphere lakes worldwide. *Geophysical Research Letters*, 47(12): e2020GL087953 [DOI: 10.1029/2020GL087953]
- Watts A C, Ambrosia V G and Hinkley E A. 2012. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4(6): 1671-1692 [DOI: 10.3390/rs4061671]
- Weber H, Riffler M, Nöges T and Wunderle S. 2016. Lake ice phenology from AVHRR data for European lakes: an automated two-step extraction method. *Remote Sensing of Environment*, 174: 329-340 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.014]
- Weeks W F, Gow A J and Schertler R J. 1981. Ground-Truth Observations of Ice-Covered North Slope Lakes Imaged by Radar. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report* 81-19
- Wei Q F. 2010. Methods of lake ice monitoring by remote sensing at Nam Co. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (魏秋方. 2010. 纳木错湖冰的遥感监测方法研究. 北京: 中国科学院研究生院)
- Wei Q F and Ye Q H. 2010. Review of lake ice monitoring by remote sensing. *Progress in Geography*, 29(7): 803-810 (魏秋方, 叶庆华. 2010. 湖冰遥感监测方法综述. 地理科学进展, 29(7): 803-810) [DOI: 10.11820/dlkxjz.2010.07.005]
- Weyhenmeyer G A, Meili M and Livingstone D M. 2005. Systematic differences in the trend towards earlier ice-out on Swedish lakes along a latitudinal temperature gradient. *SIL Proceedings*, 1922-2010, 29(1): 257-260 [DOI: 10.1080/03680770.2005.11902009]
- Wu Q H, Li C Y, Sun B, Shi X H, Zhao S N and Han Z M. 2019. Change of ice phenology in the Hulun Lake from 1986 to 2017. *Progress in Geography*, 38(12): 1933-1943 (吴其慧, 李畅游, 孙标, 史小红, 赵胜男, 韩知明. 2019. 1986—2017年呼伦湖湖冰物候特征变化. 地理科学进展, 38(12): 1933-1943) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.12.009]
- Wu Y H, Duguay C R and Xu L L. 2021. Assessment of machine learning classifiers for global lake ice cover mapping from MODIS TOA reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 253: 112206 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112206]
- Wu Y H, Guo L N, Fan L X, Wen M X, Chi H J and Zhang B. 2022. Lake ice phenology of the Nam Co at Tibetan Plateau: remote sensing and modelling. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 193-200 (吴艳红, 郭立男, 范兰馨, 文梦宣, 迟皓婧, 张兵. 2022. 青藏高原纳木错湖冰物候变化遥感监测与模拟. 遥感学报, 26(1): 193-200) [DOI: 10.11834/jrs.20221288]
- Yang X, Pavelsky T M, Bendezu L P and Zhang S. 2022. Simple method to extract lake ice condition from Landsat images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4202010 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3088144]
- Yao X J, Li L, Zhao J, Sun M P, Li J, Gong P and Li A N. 2015. Spatial-temporal variations of lake ice in the Hoh Xil region from 2000 to 2011. *Acta Geographica Sinica*, 70(7): 1114-1124 (姚晓军, 李龙, 赵军, 孙美平, 李净, 宫鹏, 安丽娜. 2015. 近10年来可可西里地区主要湖泊冰情时空变化. 地理学报, 70(7): 1114-1124) [DOI: 10.11821/dlxb201507008]
- Yin Q J and Yang Y L. 2005. Remote sensing monitoring of Lake Qinghai based on EOS/MODIS data. *Journal of Lake Sciences*, 17(4): 356-360 (殷青军, 杨英莲. 2005. 基于EOS/MODIS数据的青海湖遥感监测. 湖泊科学, 17(4): 356-360) [DOI: 10.3321/j.issn:1003-5427.2005.04.013]
- Zeng T, Shi L J, Marko M, Cheng B, Zou J H and Zhang Z P. 2016. Sea ice thickness analyses for the Bohai Sea using MODIS thermal infrared imagery. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(7): 96-104 [DOI: 10.1007/s13131-016-0908-8]
- Zhao Y S. 2003. Principles and Methods of Remote Sensing Applications. Beijing: Science Press (赵英时. 2003. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社)
- Zhou M Q, Wang Y L, Liang H, Zeng T Y, Huang W J, Wang J S and Huang X D. 2019. Comparative analysis of the snow coverage products of Soumi-NPP and MODIS in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 41(1): 36-44 (周敏强, 王云龙, 梁慧, 曾桐瑶, 黄文洁, 王健顺, 黄晓东. 2019. 青藏高原Soumi-NPP和MODIS积雪范围产品的对比分析. 冰川冻土, 41(1): 36-44) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0320]
- Zhu Z and Woodcock C E. 2012. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118: 83-94 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.028]
- Zhuang L C, Wang N A, Zhang X H, Zhao L Q and Su X B. 2021. Analysis on the difference of the spatial model of lake ice freezing and melting in the Badain Jaran Desert. *Journal of Desert Research*, 41(3): 214-223 (庄立超, 王乃昂, 张洵赫, 赵力强, 苏贤保. 2021. 巴丹吉林沙漠典型湖冰冻结—消融的空间模式差异. 中国沙漠, 41(3): 214-223) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00011]

Advances in lake ice monitoring methods based on remote sensing technology

TONG Jie^{1,2}, GAO Yongnian², ZHAN Pengfei^{1,3}, SONG Chunqiao¹

1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Lake ice is not only an important part of the cryosphere but also one of the most direct indicators of global climate change. In the context of climate warming and intensified human activities, global lake ice presents a trend of delayed freeze onset date, advanced break onset date, shortened ice cover duration, and thinning ice thickness. This trend tends to last for a long time. Consequently, a series of chain reactions of lake physical hydrology, hydrochemistry, and ecosystem will inevitably be triggered, further heaving the burden of natural environment and habitat construction. Therefore, it is necessary to perform fine-scale monitoring and scientific analysis of spatiotemporal patterns on lake ice variations for further predicting the early warning of global climate change. Toward overcoming the limitation of in-situ surveys, remote sensing technique comes to play a significant role in lake ice monitoring, which can provide large-scale, long time series, and high temporal resolution data for lake ice research. Previous efforts always focus on lake ice and its response to climate change using different remote sensing sensors, parameters, and characteristics. Through reviewing pioneering research, this study presents a general review on the remote sensing data source and methods for lake ice studies as well as spatial and temporal variations of lake ice in global hotspots. This paper first reviews the development of the commonly used remote sensing data sources for lake ice monitoring, which include spaceborne and airborne remote sensing platforms and existing lake ice data products. Then, the methods of lake ice identification and retrieval of lake ice phenology and ice thickness parameters are compared and discussed. Threshold and index-based methods are commonly used in lake ice research. According to the previous studies, this review likewise summaries the research hotspots of lake ice and analyzes the spatial and temporal characteristics of lake ice variations. The research hotspots are mostly distributed in the Northern hemisphere, especially in Northern Europe, North America, and the Tibetan Plateau. In addition, influencing factors of lake ice variations, including climate factors and lake shape attributes, are discussed in this study. Finally, future development directions of lake ice study by remote sensing are discussed as follows: (1) to fully integrate multiple satellite data at medium and high spatial resolution to improve the accuracy of lake ice observations, particularly for small- and medium-sized lakes; (2) to reconstruct the long time series of lake ice phenology and thickness information and predict their future changes based on techniques such as big earth data and machine learning methods; and (3) to focus more on the research of past, present, and future of lake ice variation characteristics in the Tibetan Plateau, which is rather sensitive to climate change and remains largely unexplained. Remote sensing is an effective tool to monitor the variations of lake ice, yet what we should do imperatively is to advance the scientific understanding on climate change impacts and take immediate actions.

Key words: lake ice, lake ice phenology, ice thickness, remote sensing monitoring, climate change

Supported by Strategic Priority Program of the Chinese Academy of Science (No. XDA23100102); Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (No. 2019QZKK0202)