

doi: 10.6046/gtzyyg.2020068

引用格式: 潘梦, 曹云刚. 高亚洲地区冰湖遥感研究进展及展望[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 1-8. (Pan M, Cao Y G. Present status and perspectives of remote sensing survey of glacial lakes in High Asia [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 1-8.)

# 高亚洲地区冰湖遥感研究进展与展望

潘梦<sup>1</sup>, 曹云刚<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756; 2. 西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 成都 611756)

**摘要:** 高亚洲是全球冰湖分布最为集中的地区之一, 利用遥感技术开展该区域的冰湖研究对于全球变化分析与自然灾害评估具有重要意义。参考国内外大量研究文献与报告, 全面回顾了高亚洲冰湖信息遥感提取数据源、信息提取方法的发展历程, 并进一步围绕冰湖时空变化格局及其对全球变化的响应等方面, 详细分析了目前国内外针对高亚洲冰湖相关研究的进展及主要成果。结合遥感机理与图像处理技术、遥感数据源的最新发展, 对高时空分辨率遥感在冰湖相关研究领域的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 遥感; 冰湖; 高亚洲; 时空变化; 气候变化

**中图分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2021)01-0001-08

## 0 引言

冰湖是反映全球变化的重要敏感因子之一, 它是全球变暖与冰川消融共同作用的结果。高亚洲地区拥有全球最大的低纬度高海拔冰川, 形成了全球分布最为密集的冰湖区域, 由于高原冰湖变化与气候变化的内在联系以及冰湖溃决等自然灾害频发的重大影响<sup>[1-2]</sup>, 使得高亚洲地区冰湖研究一直是相关领域科研人员所关注的热点。由于高亚洲区域特殊的地形地貌特点, 使得遥感技术成为开展大范围高原冰湖研究的重要手段。尽管基于遥感技术的高亚洲冰湖信息提取、冰湖时空演变特征分析及全球变化响应领域已经拥有大量的科学研究成果, 但是多是基于局部区域开展, 且在时间尺度分辨率方面也存在不足, 同时现阶段还缺少对相关研究成果的系统梳理与总结。鉴于此, 本文通过对现阶段高亚洲地区冰湖遥感研究文献的计量分析, 整理出当前研究的诸多热点问题, 分析了高亚洲地区冰湖研究的区域性特征与差异, 总结了冰湖信息遥感提取技术的发展历史和现状, 介绍了高亚洲地区冰湖时空特征分析、冰湖全球变化响应的最新研究进展与成果, 同时还探讨了冰湖遥感研究领域的不足及未来的发展趋势, 以期对冰湖研究提供有益借鉴。

## 1 高亚洲冰湖遥感研究的文献计量分析

在过去的 30 a 中, 高亚洲冰湖作为一个独特的地理对象, 受到了广大科研工作者的极大关注。本文整理了 Web of Science 中已有的文献记录, 对近 30 a 来高亚洲地区冰湖研究成果的时间和空间特征进行了初步分析。在 Web of Science 数据库中, 以“glacial lake”为主题, 筛选出 1990—2019 年之间发表的关于高亚洲冰湖研究的文章, 共计 319 篇。全球有超过 30 个国家开展了高亚洲区域冰湖的相关研究, 图 1 中列出了发文量前 8 的国家, 其中中国凭借特殊的区位优势, 已经成为高亚洲冰湖研究的引领者。

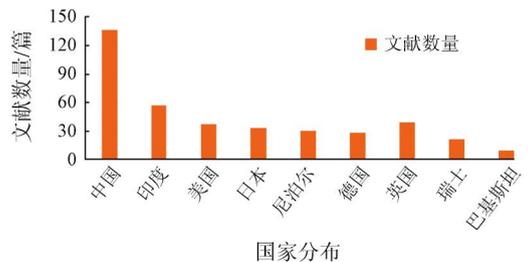


图 1 1990—2019 年高亚洲冰湖研究国家分布  
Fig. 1 Study country distribution of High Asia glacial lake in 1990—2019

收稿日期: 2020-03-06; 修订日期: 2020-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目“高速铁路沿线地表环境隐患的语义理解与遥感智能识别”(编号: 41771451)资助。

第一作者: 潘梦(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事资源环境遥感应用方面的研究。Email: 17828176816@163.com。

通信作者: 曹云刚(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事遥感数字图像处理、资源环境遥感应用等方面的研究。Email: yungang@swjtu.cn。



虽然野外实地测量是获取冰湖位置和轮廓信息最为有效的办法,但由于高亚洲地区冰湖分布范围广泛,所处环境恶劣,且动态变化显著,从而难以在大尺度区域对其进行动态监测<sup>[4]</sup>。遥感技术(尤其是卫星遥感)凭借其全球覆盖和高时间、高空间分辨率的优势,已被广泛应用于大区域尺度的冰川及冰湖监测。针对高亚洲冰湖形态遥感监测的研究进展,本文从遥感数据来源与遥感数据处理方法 2 个方面进行总结。

### 2.1.1 冰湖遥感数据源

目前,全球范围内可用于冰湖调查的卫星遥感数据种类较多,本文根据已有的文献材料汇总整理出现阶段冰湖遥感研究中被广泛使用的遥感数据源,如表 1 所示。Google Earth 影像也广泛用于冰湖监测未列入表内。

表 1 冰湖遥感监测常用星载遥感数据列表

Tab. 1 List of satellites/sensors used for glacial lake monitoring

卫星/传感器	空间分辨率/m	重访周期/d	发射时间
MODIS Terra/aqua	250	1	1999 - 12/2002 - 05
Landsat MSS	80	18	1972 - 07/1975 - 01/ 1978 - 03/1982 - 07/ 1984/03
Landsat TM	30	16	1982 - 07/1984 - 03
Landsat ETM +	30( 全色 15)	16	1999 - 04
Landsat OLI	16	16	2013 - 02
SPOT 1 - 4	20	26	1986 - 02/1990 - 01/ 1993 - 09
SPOT 5	10	5	2002 - 05
IKONOS	4( 全色 1)	3	1999 - 09
RESOURCESAT - 1 (LISS 3)	23.5( 全色 5.8)	24	2013 - 7
QuickBird	2.44	1 - 6	2001 - 10
ASTER	15	16	1999 - 12
Sentinel - 1	5	12	2014 - 04
Sentinel - 2	10	10	2015 - 06
GF - 1	8( 全色 2)	4	2013 - 04
GF - 2	4( 全色 1)	5	2014 - 08

国际上采用卫星遥感数据开展冰湖遥感监测始于 1970 年。到目前为止,Landsat 系列数据是国内外进行长时间序列(1970 年—2019 年)冰湖遥感监测的主要数据源,尤其是 2013 年发布的具有相对高时间和空间分辨率的 Landsat8 数据,已成为全球冰湖研究的首选。Landsat 等光学遥感数据在进行大范围长时间序列冰湖信息提取时具有极大优势,但却面临着成像质量造成的数据缺失问题,全天时、全天候观测的微波遥感数据(ASAR, Sentinel - 1)成为其有效补充。随着近年来高亚洲地区冰湖研究的扩展和深入,有证据显示面积较

小的冰湖对气候变化的敏感程度更高<sup>[5]</sup>,因此高空间分辨率光学遥感数据(米级或亚米级)被用于小区域冰湖信息提取,进而开展局部精细化研究。总的来看,单一数据源难以满足全面、准确评估区域内冰湖动态变化的需求,开展粗、细分辨率共存,多源数据优势互补的冰湖信息提取研究,将有助于全方位了解冰湖的变化情况。

### 2.1.2 冰湖轮廓遥感提取方法

鉴于高亚洲地区特殊的地理位置,遥感技术在本区域的冰湖研究中发挥了巨大作用。近年来,研究人员为了提高高寒区域冰湖的识别精度,在数据源优选和数据分析方法上不断进步,将冰湖信息遥感提取手段由最初的人工目视解译,逐步发展为人工辅助的半自动分析,进而构建了全自动的冰湖信息提取方法。

1) 冰湖手动提取。作为冰湖形态信息遥感提取最常用的方法,人工目视解译的手动冰湖信息提取技术在 1970 年—2000 年阶段被广泛使用,大量的研究人员使用 1970 年—1980 年的航空影像和 2000 年左右的 Landsat, ASTER 等航天遥感影像开展了目视解译工作。如 Xu Q H 等在 1989 年对喜马拉雅山进行考察时,采用目视解译的方法对冰湖进行识别和编目<sup>[6]</sup>。王欣团队基于 ArcGIS, ENVI, Google Earth 等软件采用人工数字化的方法完成了高亚洲地区以及以青藏高原为核心的中国西部的冰湖编目<sup>[7-8]</sup>。张国庆等使用人工数字化的方法完成了第三极冰湖编目<sup>[5]</sup>。

冰湖手动提取方法虽然精度较高,但费时费力,难以满足大范围冰湖识别的需求。随着遥感数据分辨率的提升与遥感数字图像处理技术的快速发展,半自动/全自动的冰湖识别方法也日趋丰富。

2) 冰湖半自动提取。冰湖半自动提取是指在冰湖轮廓提取过程中,需要部分依赖于手工工作或人为的规则设置,主要包括半自动轮廓跟踪,区域生长和阈值分类等方法,其中又以阈值法应用最为广泛。如 Frey 等 2010 年提出一种基于多光谱光学遥感数据和 DEM 的半自动冰湖检测方法<sup>[9]</sup>。王欣等在研究近 20 a 来天山冰湖变化时,有针对性地针对每景 Landsat 影像手动设置 NDWI 阈值,然后将阈值作为输入条件输入决策树中,进行冰湖的提取<sup>[10]</sup>。Raj G 等 2013 年根据 NDWI 手动设置阈值,叠加 DEM 数据识别喜马拉雅山锡金地区的冰湖,并完成了锡金地区的冰湖编目<sup>[11]</sup>。张波等基于时序 SAR 影像的强度归一化比值来提取贡巴冰川末端冰湖,通过人工选样来确定区分水体与非水体的最佳阈值<sup>[12]</sup>。

阈值法提取冰湖简单有效,但是受发育环境影响,冰湖颜色、浊度、叶绿素含量不一样,导致冰湖间光谱分布具有明显差异。此外,山体阴影的特征和冰湖的特征也非常相似,因此难以使用固定(单)阈值来大范围提取冰湖。在实际工作中,需要对每一幅影像手动设置阈值,以期得到冰湖与冰、雪、阴影的最佳分类阈值。Mikari K V 等基于 Sentinel-2 数据使用最佳阈值确定法与 Sobel 边缘检测相结合的半自动方法提取甘戈特里的冰湖,能够较好地地区分水体与冰、雪、阴影<sup>[13]</sup>。Jain S K 等<sup>[14]</sup>基于 ASTER 数据采用支持向量机的方法半自动地检测了喜马拉雅山不丹地区冰湖,此方法在提取受阴影影响的冰湖方面优于 NDWI 阈值法。Bulley 等在 2013 年基于 ASTER 数据采用集成分类树与空间度量的方法分析喀喇昆仑山脉冰川与冰湖的变化,但此方法在图像分割时需要进行人工样本选择与训练<sup>[15]</sup>。

半自动提取方法虽然使用较为广泛,在效率方面就人工方法提升显著,但是其诸多步骤具有人工依赖和区域限制的特点,从而限制了其在全球/半球等大尺度范围的推广与应用。

3) 冰湖全自动提取。冰湖全自动提取方法是指事先建立固定的模型或规则,然后自动执行,不需人工干预就能完成冰湖形态信息的提取。Li J 等 2012 年基于“全域-局部”的分层迭代思想,提出了遥感影像与 DEM 相结合的冰湖信息自动化提取方法,并将其应用于喜马拉雅山冰湖的提取<sup>[16]</sup>。全局-局部阈值分割算法能够在一定程度上实现冰湖的精确自动提取,但对于微型冰湖来说,由于其与背景信息具有非常相似的光谱,从而造成特征混淆,自动识别算法的精度受到极大的影响。针对光谱异质性, Zhao H 等将水平集分割理论应用到冰湖提取中,使用阈值分割和简化活动轮廓模型方法基于 Landsat8 数据进行高亚洲 3 个典型冰湖发育区域:喜马拉雅山中部、藏东南地区和阿尔泰山区域冰湖的提取,并与 FCM(阈值法和模糊聚类分析)方法进行对比,结果表明 TSCV 的准确率为 73.92%,FCM 的准确率是 66.30%,研究成果提高了小冰湖提取的精度<sup>[17]</sup>。Chen F 等使用上述 TSCV 方法基于 Google Earth Engine 平台识别了 2015 年整个青藏高原的冰湖,其中喀喇昆仑山北部、昆仑山西部、喜马拉雅山北部、藏东南地区的测试精度均在 90% 以上,提高了大规模自动化冰湖信息提取的准确率<sup>[18]</sup>。该团队同时基于 GF-2 影像使用 NDWI 与非局部活动轮廓结合的方法识别了阿尔泰山区域的冰湖,证明此方法同样适用于高分辨率遥感影像识别微型冰湖<sup>[19]</sup>。Veh G 等基于 Landsat 数据使用 RF(随机森林)算法识

别了 1988—2016 年喜马拉雅山溃决冰湖,总体精度可达到 91%<sup>[20]</sup>。Bhardwaj A 等基于 Landsat8 数据结合湿度指数 WI 和模糊聚类法(LDA)自动提取了 Shaune Garang 冰川附近的冰湖,提取精度可达 99%<sup>[21]</sup>。

自动识别方法中,机器学习的一些方法如聚类、决策树、支持向量机、随机森林等,对于冰湖提取的准确性在很大程度上取决于先验知识的选择和训练样本的可靠性。基于图像分割技术的 TSCV 方法较好,能够克服光谱异质性的影响,同时能够识别浑浊的小冰湖,但计算过程较复杂,算法的普适性也不尽理想,仅适用于 Landsat8 数据,对 Landsat5 数据及一些高分辨率影像,如 GF-2, WorldView 数据等,其冰湖识别精度还有待大范围检验。

## 2.2 冰湖水量信息提取

冰湖水量对于研究冰湖溃决具有重要意义。现有冰湖水量通常是通过体积-面积-水位经验公式进行计算<sup>[22]</sup>。其中,冰湖水深多使用声呐测深仪测量,水位则采用 ICESat 等激光测高卫星测量。如 Yao X J 等使用 SyQwest Hydrobox<sup>TM</sup> 高分辨率便携式测深仪与橡皮艇和 GPS 相连测量龙巴萨巴冰湖的水深,结果显示声纳数据的测量平均误差为 1~2 m,可用于湖盆面积计算冰湖体积(水量)<sup>[23]</sup>。Yang R M 等使用 Hydro science 便携式超声波测深仪进行藏东南米堆冰湖的水深测量,获得了米堆冰湖的水下地形,然后采用 Cut/Fill 方法计算冰湖储水量<sup>[24]</sup>。Song 等使用 ICESat 和 Cryosat-2 组合测高仪研究念青唐古拉山区域内的湖泊水面高度变化,结果显示所有湖泊都呈现出水位升高的趋势,其中冰湖水位的增长率( $0.421 \pm 0.018$  m/年)高于非冰湖增长率( $0.171 \pm 0.036$  m/年)<sup>[25]</sup>。

通过遥感技术来开展冰湖水量信息提取,可以较为高效地获取冰湖面积、冰湖水位(水深)等信息,但是由于无法精确获取水下地形,还需利用体积-面积-水位经验公式进行水量估算。受限于冰湖样本数量,难以建立适用于所有冰湖的体积-面积-水位经验公式,使得经验模型计算冰湖水量误差率可高达 100%<sup>[26]</sup>。由此可见,高精度的水下地形测量技术是未来实现冰湖水量精确提取的重要手段。

## 2.3 冰湖水质信息提取

湖泊水质是反映水体变化及其对气候变化响应的重要指标之一<sup>[27]</sup>。人为活动影响较少的冰湖对于气候变化研究更为有利。当前可查阅的研究文献中,几乎未见采用空间遥感技术进行冰湖水质研究的相关报道,水质信息提取一般通过野外

采样,实验室检测的方式实施。如 Yan H M 等在 2008 年采集了珠穆朗玛峰区域 3 个冰湖的样本,分析发现冰湖的叶绿素含量与 CDOM(有色可溶性有机物)远低于内陆湖泊<sup>[28]</sup>。闫露霞等在 2016 年 9—10 月采集喜马拉雅山中段藏布流域的 11 个冰湖的样本,并对其水质进行评价,发现 11 个冰湖均为淡水湖,并且冰湖水体受到 Fe, Mn, Cr, Ni 的污染较为严重<sup>[29]</sup>。Salerno F 等在研究喜马拉雅山中部冰湖水质时,发现冰湖中的重金属含量与冰湖融水有关,由于冰川融化导致冰底的硫化物释放,使得喜马拉雅山中部冰湖中的硫酸根离子浓度在近 20 a 增加了 4 倍<sup>[30]</sup>。

由于所处的高寒/高海拔位置,大大增加了高亚洲冰湖水质样本采集的难度,同时也造成采样点时空分布严重不均匀,开展长时间大规模尺度冰湖水质研究具有较大的难度。随着全球范围内高光谱遥感技术的快速发展,有望在近期提升高亚洲地区冰湖水质信息提取的能力,从而推动相关领域的科学研究水平。

### 3 高亚洲冰湖时空演变对气候变化的响应分析

冰湖演变是一个复杂的过程,且存在显著的区域差异,研究冰湖时空特征及其区域差异不仅对水资源评价和冰湖溃决风险分析具有重要意义,同时也对研究全球气候变化的区域差异有积极作用。本文从冰湖时空演变格局及其对全球变化的响应 2 个方面来总结高亚洲区域的研究现状。

#### 3.1 冰湖时空格局演变特征分析

冰湖时空变化分析在研究水资源格局变化及灾害预警等方面都具有重大意义。大量研究者利用不同时期的遥感影像以及现有的冰川、冰湖编目等资料,对近几十年高亚洲地区冰湖时空变化进行全方位分析。本文汇总整理了近年来高亚洲地区冰湖时空演变方面的研究成果(表 2),发现现有对冰湖的时空变化差异分析几乎覆盖了高亚洲所有区域,如图 6(a),(b)所示。其中,王欣等<sup>[31]</sup>

表 2 近 30 年高亚洲不同地区冰湖时空变化研究结果列表

Tab. 2 Results of glacial lake spatiotemporal change in the major mountains on the High Asia

区域/流域	时段/年	①前一期面积/km <sup>2</sup>	后一期面积/km <sup>2</sup>	年平均面积变化/(km <sup>2</sup> a <sup>-1</sup> )	年平均面积变化率/(% a <sup>-1</sup> )	参考文献
阿尔泰山	1992—2013	205.796	235.825	1.430	0.690	[32]
北天山	1990—2010	15.89 ± 2.90	19.53 ± 3.43	0.182	1.150	[33]
西天山	1990—2010	7.37 ± 1.11	9.15 ± 1.42	0.089	1.210	[33]
中央天山	1990—2010	37.38 ± 4.67	39.05 ± 4.99	0.084	0.230	[33]
东天山	1990—2010	22.08 ± 3.19	28.79 ± 4.39	0.336	1.520	[33]
西昆仑山(塔里木盆地)	1990—2013	6.98 ± 1.10	8.92 ± 1.19	0.084	1.210	[2]
喀喇昆仑山(塔里木盆地)	1990—2013	14.74 ± 1.13	16.81 ± 1.09	0.090	0.609	[2]
阿尔金山(塔里木盆地)	1990—2013	1.00 ± 0.33	1.55 ± 0.38	0.024	2.390	[2]
帕米尔高原(塔里木盆地)	1990—2013	78.01 ± 2.74	86.07 ± 2.67	0.350	0.449	[2]
藏东南	1988—2013	85.58	93.65	0.323	0.377	[36]
横断山	1990—2014	248.9 ± 29.9	255.8 ± 31.6	0.288	0.117	[1]
喜马拉雅山	1990—2015	398.9 ± 65.3	455.3 ± 72.7	2.256	0.570	[30]

①: 前、后一期是指研究时间段的开始、结束时间。

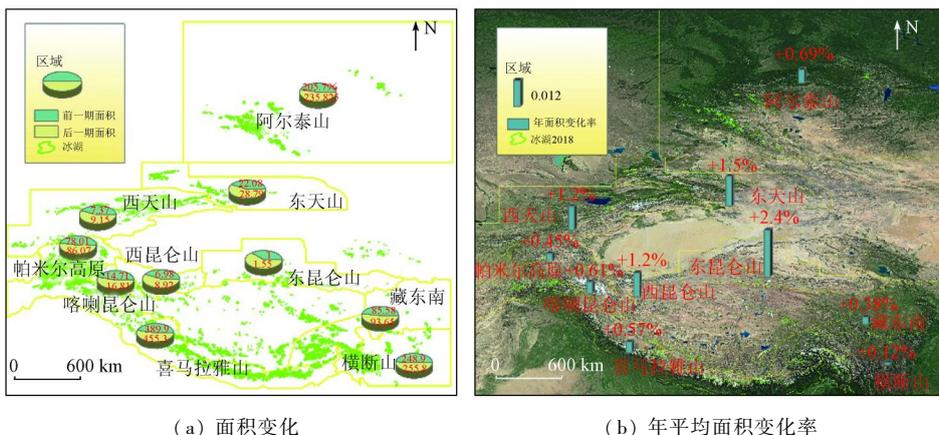


图 6 高亚洲各区域 21 世纪前后冰湖变化专题图

Fig. 6 Thematic map of glacial lake change around the 21st century in different regions of High Asia

使用 1990 年和 2018 年两期 Landsat 数据提取了高亚洲区域冰湖, 28 a 内高亚洲区域冰湖面积增加了  $263.20 \pm 28.24 \text{ km}^2$ , 整体扩张速率为 15.5%。Nie Y 等使用 1990 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 5 期 Landsat 数据分析了整个喜马拉雅山冰湖的时空变化<sup>[32]</sup>。舒梅海<sup>[33]</sup>、吴坤鹏<sup>[34]</sup>分析了阿尔泰山、天山区域冰湖分布及变化特征等等。

此外, 现有研究还从不同角度、不同作用形式上分析了冰湖的时空演变特征。如 Gardelle J 等对 1990—2009 年喜马拉雅—兴都库什地区提取的冰湖进行分析, 结果表明在各山脉分区内部的冰湖可能存在面积变化截然相反的情况<sup>[35]</sup>。Nie Y 等从位置和地形方面分析了喜马拉雅山区域冰湖的分布特点, 研究表明喜马拉雅山南北侧、中、西东部冰湖面积、数量、扩张速率存在差异<sup>[36]</sup>。Song C 等<sup>[37]</sup>、Zhang G 等<sup>[5]</sup>研究表明冰湖的时空变化与冰川的变化紧密相连, 且海拔越高, 冰湖的数量、面积的变化越大, 呈现出显著的垂直变化差异。

总体而言, 现有冰湖时空变化分析多是基于 Landsat 等中高分辨率遥感数据提取的冰湖信息开展的。受制于遥感数据源质量与冰湖信息提取算法性能, 冰湖的制图精度及时间连续性存在不足从而对相关研究产生显著影响, 尤其是制约了精细化的区域冰湖时空演变研究。

### 3.2 冰湖变化对全球气候变化的响应

冰湖变化是气候波动的产物, 同时又反馈于气候变化, 它们存在内在的响应机制。目前有关冰湖变化与气候变化之间响应机制的研究报道并不多见, 对两者的关系研究主要集中于在进行冰湖时空变化差异分析时, 探究其与气候变化之间的联系。如 Hasnain S I<sup>[38]</sup>研究了气候变化背景下喜马拉雅山地区冰川与冰湖的变化, 认为全球变暖背景下气温升高是该地区冰川和冰湖变化的主要驱动因素。Wu S<sup>[39]</sup>定量评价了喜马拉雅山容克西盆地冰川退缩与冰湖扩张变化, 结果显示冰川呈现整体退缩、冰湖呈现整体扩张的趋势, 结合气温和降水资料分析后发现, 持续的升温是造成当前冰川退缩和冰湖扩张的主要驱动因素。王欣等在研究横断山冰川与冰湖时也表明气温上升是导致冰湖扩张的主要原因, 同时表明受走廊屏障的影响, 冰湖分布存在时空差异<sup>[31]</sup>。

总体而言, 持续的升温可能是造成当前高亚洲冰川退缩和冰湖扩张的主要驱动因素, 表现为冰湖数量的增加与面积的扩张, 但是在气候变化影响背景下的冰湖时空变化具有明显的差异性。王欣等<sup>[31]</sup>、Zhang G 等<sup>[5]</sup>系统研究冰川—冰湖—气候三

者响应关系时表明, 气温升高造成的母冰川融水是冰湖扩张的主要原因, 并且研究了不同海拔高度下升温率不同造成冰湖的变化差异, 有助于深入研究区域气候垂直变化及差异。同时 Zhang G 等在研究第三极冰湖时表明, 面积较小的冰湖 ( $< 0.05 \text{ km}^2$ ) 变化速率最快, 面积越小, 对气候变化越敏感<sup>[5]</sup>。

上述研究均是通过冰湖面积及数量与气象站的气温、降水、蒸发之间的统计分析得出的结论。但是冰湖发育地区气象数据非常有限, 且分布极为不均匀, 难以精准地表示气候的变化, 同时对局部区域的统计分析也不足以揭示其响应的科学规律。此外, 冰湖水位、水量、水质的变化与气候变化之间有何关联, 如何揭示冰湖全要素与气候变化之间的复杂响应规律还任重而道远。

## 4 总结与展望

本文回顾了高亚洲冰湖信息遥感提取的发展历程, 系统总结了其时空演变及对气候变化响应等的研究成果, 结果表明在遥感技术加持下, 高亚洲冰湖研究发展快速, 但其在数据源、分析方法, 研究的完整性、系统性方面还需要进一步加强, 主要包括以下几个方面:

1) 构建冰湖全要素智能提取与集成分析方法。现有冰湖形态信息提取多基于单一数据源和冰湖光谱特征进行, 且多采用带有局部适用性的半自动方法提取轮廓边界。为了更为智能有效地获取冰湖边界和面积信息, 基于多源观测数据(光学、SAR 及 Lidar)一体化处理、基于深度学习的冰湖高层次特征表达与全自动化提取方法成为未来冰湖遥感研究的重要方向。此外, 现有冰湖水量、冰湖水质研究多基于局部区域开展, 多数研究成果具有显著的地域特征, 缺乏在大区域尺度的普适性研究成果。因此, 发展高普适性的冰湖全要素感知技术, 开展冰湖全要素智能集成分析是需要重点关注的研究方向。

2) 揭示冰湖—气候变化的复杂响应规律。大区域范围内冰湖—气候变化响应机制的统一规律有益于揭示全球气候变化趋势。但现有研究成果多是对局部区域的冰湖面积及数量与气象站的气温、降水、蒸发之间的简单线性分析得出的, 粗分辨率气象数据与高分辨率识别的冰湖尺度无法匹配, 且冰湖全要素与气候变化响应程度研究也存在诸多局限性, 局部区域的简单统计分析不足以揭示其响应规律, 开展大区域尺度下顾及尺度差异的冰湖全要素与气候变化之间的响应机制具有重要意义。

3) 探索多学科交叉的冰湖研究模式。冰湖遥

感是冰湖研究的重要分支,此外其还涉及水文、灾害、大气、生态、化学等相关学科,通过加强相关学科的交叉融合,有助于增强其在水文、灾害等方面的应用能力,同时不同学科领域的发展又为冰湖遥感提供更多的应用机遇,开展多平台、多技术、多尺度、多过程的多学科交叉研究是冰湖遥感研究的必然趋势。

## 参考文献 (References):

- [1] Wang X, Chai K, Liu S, et al. Changes of glaciers and glacial lakes implying corridor-barrier effects and climate change in the Hengduan Shan, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 63 (239): 535-542.
- [2] Wang X, Liu Q, Liu S, et al. Heterogeneity of glacial lake expansion and its contrasting signals with climate change in Tarim Basin, Central Asia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75 (8): 696.
- [3] Merzbacher G. *The Central Tian-Shan Mountains 1902-1903* [M]. London: J Murray, 1905.
- [4] Zhang M, Chen F, Tian B. Glacial lake detection from GaoFen-2 multispectral imagery using an integrated nonlocal active contour approach: A case study of the Altai Mountains, Northern Xinjiang Province [J]. *Water*, 2018, 10 (4): 455.
- [5] Zhang G, Yao T, Xie H, et al. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 131: 148-157.
- [6] Xu Q H, Liu D M, Feng C H. Dangerous glacial lake and outburst features in Xizang Himalayas [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44 (3): 343-352.
- [7] 杨成德, 王欣, 魏俊锋, 等. 2015年中国西部冰湖编目数据集 [J/OL]. *中国科学数据*, 2018, 3 (4). (2018-06-28). doi: 10.11922/csdata.2018.0038.zh.  
Yang C D, Wang X, Wei J F, et al. A dataset of glacial lake inventory of West China in 2015 [J/OL]. *China Science Data*, 2018, 3 (4). (2018-06-28). doi: 10.11922/csdata.2018.0038.zh.
- [8] Wang X, Guo X Y, Yang C D, et al. Glacial lake inventory of High Mountain Asia [J]. *National Cryosphere and Desert Scientific Data Center*, 2019. doi: 10.12072/casnw.064.2019.db.
- [9] Frey H, Huggel C, Paul F, et al. Automated detection of glacier lakes based on remote sensing in view of assessing associated hazard potentials [J]. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 2010, 45: 261-272.
- [10] 王欣, 吴坤鹏, 蒋亮虹, 等. 近 20 年天山地区冰湖变化特征 [J]. *地理学报*, 2013, 68 (7): 983-993.  
Wang X, Wu K P, Jiang L H, et al. Wide expansion of glacial lakes in Tianshan Mountains during 1990-2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68 (7): 983-993.
- [11] Raj G, Babu K, Kumar V K, et al. Remote sensing-based inventory of glacial lakes in Sikkim Himalaya: Semi-automated approach using satellite data [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2013, 4 (3): 241-253.
- [12] 张波, 张瑞, 刘国祥, 等. 基于 SAR 影像的贡巴冰川末端冰湖年际变化监测及溃决规律分析 [J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2019, 44 (7): 1054-1064.
- [13] Zhang B, Zhang R, Liu G X, et al. Monitoring of interannual variabilities and outburst regularities analysis of glacial lakes at the end of Gongba glacier utilizing SAR images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44 (7): 1054-1064.
- [14] Mitkari K V, Arora M K, Tiwari R K. Extraction of glacial lakes in gangotri glacier using object-based image analysis [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10 (12): 5275-5283.
- [15] Jain S K, Sinha R K, Chaudhary A, et al. Expansion of a glacial lake, Tsho Chubda, Chamkhar Chu Basin, Hindukush Himalaya, Bhutan [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75 (2): 1451-1464.
- [16] Bulley H N N, Bishop M P, Shroder J F, et al. Integration of classification tree analyses and spatial metrics to assess changes in supraglacial lakes in the Karakoram Himalaya [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34 (2): 387-411.
- [17] Li J, Sheng Y. An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: A case study in the Himalayas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33 (16): 5194-5213.
- [18] Zhao H, Chen F, Zhang M. A systematic extraction approach for mapping glacial lakes in high mountain regions of Asia [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11 (8): 2788-2799.
- [19] Chen F, Zhang M, Tian B, et al. Extraction of glacial lake outlines in Tibet Plateau using Landsat 8 imagery and Google Earth Engine [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10 (9): 4002-4009.
- [20] Zhang M, Chen F, Tian B. Glacial lake detection from GaoFen-2 multispectral imagery using an integrated nonlocal active contour approach: A case study of the Altai mountains, northern Xinjiang Province [J]. *Water*, 2018, 10 (4): 455.
- [21] Veh G, Korup O, Roessner S, et al. Detecting Himalayan glacial lake outburst floods from Landsat time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 207: 84-97.
- [22] Bhardwaj A, Singh M K, Joshi P K, et al. A lake detection algorithm (LDA) using Landsat 8 data: A comparative approach in glacial environment [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 38: 150-163.
- [23] Cook S J, Quincey D J. Estimating the volume of Alpine glacial lakes [J]. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 2015, 3 (3): 909-940. doi: 10.5194/esurfd-3-909-2015
- [24] Yao X J, Liu S, Sun M, et al. Volume calculation and analysis of the changes in moraine-dammed lakes in the north Himalaya: A case study of Longbasaba lake [J]. *Journal of Glaciology*, 2012, 58 (210): 753-760.
- [25] Yang R M, Zhu L P, Wang Y J, et al. Study on the variations of lake area & volume and their effect on the occurrence of outburst of MUDUI glacier lake in southeastern Tibet [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31 (9): 1133-1140.
- [26] Song C, Sheng Y. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis [J]. *Climatic Change*, 2016, 135 (3-4): 493-507.
- [27] Cook S J, Quincey D J. Estimating the volume of Alpine glacial

- lakes. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 2015, 3 (3): 909 – 940.
- [27] Zhe M, Zhang X, Wang B, et al. Hydrochemical regime and its mechanism in Yamzhog Yumco Basin, South Tibet [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(9): 1111 – 1122.
- [28] Yan H M, Yao Z, Huang H, et al. Water quality and light absorption attributes of glacial lakes in Mount Qomolangma region [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(5): 860 – 870.
- [29] 闫露霞, 孙美平, 姚晓军, 等. 青藏高原湖泊水质变化及现状评价 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(3): 900 – 910.  
Yan L X, Sun M P, Yao X J, et al. Lake water in the Tibet Plateau: Quality change and current status evaluation [J]. *Acta Sci Circumst*, 2018, 38(3): 900 – 910.
- [30] Salerno F, Rogora M, Balestrini R, et al. Glacier melting increases the solute concentrations of Himalayan glacial lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17): 9150 – 9160.
- [31] 王欣, 刘时银, 莫宏伟, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖扩张特征及其气候意义 [J]. *地理学报*, 2011, 66(7): 895 – 904.  
Wang X, Liu S Y, Mo H W, et al. Expansion of glacial lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himalaya [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 895 – 904.
- [32] Nie Y, Sheng Y, Liu Q, et al. A regional – scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 189: 1 – 13.
- [33] 舒梅海. 近 25 年阿尔泰山山区冰川冰湖变化及特征 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
- Shu M H. Variations and characters of glacier and glacial Lakes in Altai Mountains in recent 25 years [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017.
- [34] 吴坤鹏. 天山冰湖变化及其影响研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.  
Wu K P. The change of glacial lake and its influence in Tianshan Mountains [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2014.
- [35] Gardelle J, Arnaud Y, Berthier E. Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009 [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1 – 2): 47 – 55.
- [36] Nie Y, Sheng Y, Liu Q, et al. A regional – scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 189: 1 – 13.
- [37] Song C, Sheng Y, Ke L, et al. Glacial lake evolution in the southeastern Tibetan Plateau and the cause of rapid expansion of proglacial lakes linked to glacial – hydrogeomorphic processes [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 504 – 514.
- [38] Hasnain S I. Impact of climate change on Himalayan glaciers and glacier lakes [C] // Proc. Taal 2007: The 12th World Lake Conf. 2008: 1088 – 1091.
- [39] Wu S, Yao Z, Huang H, et al. Responses of glaciers and glacial lakes to climate variation between 1975 and 2005 in the Rongxer basin of Tibet, China and Nepal [J]. *Regional Environmental Change*, 2012, 12(4): 887 – 898.

## Present status and perspectives of remote sensing survey of glacial lakes in High Asia

PAN Meng<sup>1</sup>, CAO Yungang<sup>1,2</sup>

( 1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. State – Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High – Speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China )

**Abstract:** High Asia is one of the regions with the most concentrated distribution of glacial lakes in the world, and the use of remote sensing technology to carry out glacial lake research in this region is of great significance for global change analysis and natural disaster assessment. This paper refers to a large number of domestic and foreign research literature and reports, comprehensively reviews the development process of data sources and information extraction methods for remote sensing data extraction of high Asian glacial lakes, and further analyzes the spatial and temporal changes of glacial lakes and their responses to global changes. The current research progress and main achievements of the research on the high Asian glacial lake in China and abroad are analyzed in detail. Finally, combined with the latest development of remote sensing mechanism, image processing technology and remote sensing data source, the development trend of high – spatial – resolution remote sensing in glacial lake related research fields is predicted.

**Keywords:** remote sensing; glacial lake; High Asia; spatio – temporal change; climate change

(责任编辑: 李瑜)