

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0013

Yan Lili, Wang Jian. Study of extracting glacier information from remote sensing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 110–118. [彦立利, 王建. 基于遥感的冰川信息提取方法研究进展[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 110–118.]

基于遥感的冰川信息提取方法研究进展

彦立利^{1, 2}, 王 建¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 对冰川监测中常用的遥感卫星、传感器及冰川信息提取方法等进行了综合评价, 常规方法中普遍认为比值法的精度最高, 新产生的面向对象分类和雷达干涉测量方法虽一定程度上提高了冰川提取精度, 但冰碛物仍是自动识别的难点。针对表碛覆盖冰川虽发展了一些自动、半自动的方法, 但这些方法还不够成熟、不具有通用性。积雪、冰碛物和地面验证仍是冰川自动提取存在的重要问题, 发展更先进、更成熟的方法是冰川研究的重要方向, 未来可以尝试采用粗糙集理论及 ICESAT 卫星波形提高冰川信息提取的精度。

关键词: 遥感; 比值法; 积雪; 表碛覆盖冰川; 面向对象分类; SAR 干涉测量

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

冰川变化, 尤其山地冰川变化是全球气候变化的敏感指示器, 同时冰川变化是气候变化的产物, 气候变化引起冰川积累量和消融量的变化, 最终使冰川面积增减、末端前进或退缩^[1]。冰川作为高山固体水库具有调节多年径流的作用, 是干旱区稳定可靠的水资源。冰川及其融水不仅是绿洲形成、发展和稳定的基础, 而且是环境必要和有机的组成部分^[2]。冰川变化也是影响海平面上升的主要因素之一, IPCC 报告的结果显示: 1961—2003 年冰川和冰帽对海平面上升的贡献约为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 1993—2003 年约为 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[3], 而最新估算结果增大到 $1.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[4-5], 为所有贡献量中最大, 占 2003—2008 年观测到的海平面上升速率的 44%^[6]。冰川退缩, 冰川融水增加, 可能导致洪水和泥石流的发生。气候变暖, 冰川加速退缩, 冰雪融水将出现旺盛期, 冰川泥石流将进入新的高潮期, 可能形成新的冰川泥石流灾害点^[2]。所以, 冰川变化的监测是全球变化研究的重要内容之一。

20 世纪以来气候变暖, 全球大部分冰川退缩, 最近 20 年退缩速度加剧。科学家证实全球气候变暖

将导致冰川进一步退缩^[7-8], 在气候变暖情景下大量小冰川在 21 世纪都会消失^[9-10]。通过对冰川变化的分析, 可以了解冰川变化的特征及波动趋势^[11-15], 认识冰川变化与气候变化之间的关系^[16-19], 并对将来冰川的变化做出预测^[10, 20-21], 为水资源的管理和合理利用以及防灾减灾提供科学依据。

无论是冰川响应气候变化还是影响水资源补给、海平面变化, 对冰川的监测是首要面临的问题。在多种尺度上, 遥感技术已经成为快速准确识别冰川的主要技术手段, 随着卫星及传感器的发展, 冰川监测技术不断更新, 为冰川变化研究提供了及时、准确的数据源。从遥感影像上获取准确的冰川信息是冰川变化研究的基础, 目前已发展多种自动、半自动的冰川识别方法。虽然在各自研究区取得了很好的结果, 但不同方法仍有各自的适用性, 在大尺度冰川信息提取中有一定的局限性, 而且冰碛物和积雪仍是冰川提取的难点。因此, 迫切需求发展更先进的冰川信息提取方法, 以准确获取冰川变化信息。

1 遥感卫星及传感器在冰川监测中的应用

早期的冰川监测以野外考察、地形图和航空像片为数据源, 以巨大的时间、人力和财力耗费、覆

收稿日期: 2012-08-18; 修订日期: 2012-11-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB951403)资助

作者简介: 彦立利(1983—), 女, 山东聊城人, 2010 年在兰州大学获硕士学位, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所读博士研究生, 主要从事冰冻圈遥感研究。E-mail: yanll07@lzu.cn

表 1 冰川监测常用遥感卫星及传感器

Table 1 Remote sensing satellites and sensors used in monitoring glacier change

遥感卫星	传感器	空间分辨率/m	发射时间/年	发射国家
Landsat	MSS	79.0~82.0	1972	美国
Landsat	TM	30.0	1982	
Landsat	ETM+	30.0	1999	
CBERS	CCD	19.5	1999	中国
SPOT 1-4	HRV	20.0	1986	法国
SPOT 5	HRG	10.0	2002	
Terra	ASTER	15.0	1999	美国
IKONOS	IKONOS	4.0	1999	美国
Quickbird	Quickbird	2.44	2001	美国
Formosat-2		8.0	2004	中国
IRS-P5	PAN	2.45	2005	印度
JERS-1	SAR	18.0	1992	日本
ERS-1/2	SAR	30.0	1991,1995	欧空局
ENVISAT	ASAR	30.0	2002	欧空局
ALOS	AVNIR-2	10.0	2006	日本
	PRISM	2.5		
	PALSAR	10.0		

盖率低和重复性差为代价^[21],而且由于大部分山地冰川地处偏远,气候恶劣且数量众多,仅依靠地面观测或航空摄影测量难以高效实现冰川监测.20世纪60年代以来,卫星遥感技术的发展给冰川监测带来了生机^[22],充分满足了全球冰川监测的迫切需求,促使卫星遥感技术被广泛应用于大尺度的冰川变化研究中.不同波谱范围、分辨率和覆盖范围的卫星及传感器日益增多,大大提高了冰川监测的能力,同时为不同的冰川研究提供了多种数据源.表1对冰川监测中常用的遥感卫星及其参数进行了总结.陆地资源卫星(包括MSS, TM及ETM+)成为冰川研究的主要资料源之一^[23],因为它能够连续提供自1972年以来偏远区域的冰川分布信息^[24],且覆盖范围广.此外,搭载在Terra卫星上的ASTER数据具有高空间、高波谱和高辐射分辨率的特性,具有立体像对功能,可提取高精度DEM,而且价格便宜,也被广泛应用于冰川变化的动态监测中^[25].1999年由美国航空航天局(NASA)和地质调查局(USGS)发起实施的“全球陆地冰空间测量计划”(GLIMS)^[26]以ASTER、Landsat TM/ETM+影像作为新一代冰川编目的主要数据源,并以航空相片数据、SPOT等高分辨率影像为补充,旨在对全球陆地冰川现状及变化进行动态监测^[26-28].近年来,高分辨率IKONOS^[29]、Quickbird^[30]、Formosat-2^[31]数据虽逐渐被应用到冰川研究中,但因高分辨数据价格昂贵,覆盖范围窄等因素限制了高分辨率影像在大尺度冰川研究中的应用^[32].2006年日本发射的ALOS卫星采用先进的陆地观测技术获取全球高分辨率观测数据,

ALOS卫星载有3个传感器(如表1所示),不仅拥有高分辨率和丰富的光谱信息,而且其搭载的主动式微波传感器PALSAR不受云层、天气和昼夜影响,可全天候对地观测.该卫星影像价格比较低廉,适合大尺度的冰川研究,因此,ALOS卫星在冰川研究中具有极大优势.Narama等^[33]曾利用ALOS卫星的PRISM和AVNIR数据研究天山冰川面积的变化.

光学遥感受云层的影响严重,对于高原及常年多云地区来说,选取资料极为困难.微波遥感可以穿透云雾,对地表有一定穿透能力,具有全天候、全天时的能力,为常年多云地区的冰川监测提供了有效手段^[34].逐步发展起来的合成孔径雷达技术(Synthetic Aperture Radar, SAR)成为冰川监测的重要工具.1993年Goldstein等^[35]首次利用ERS-1卫星,使用SAR干涉测量方法获取了南极冰流的运动速度,对于极地冰川以及山地冰川的研究具有重要意义.在雷达遥感应用的高潮时期,日本于1992年发射了JERS-1卫星;1995年欧空局发射了ERS-2卫星,与ERS-1串行,提供了仅相隔1天的干涉数据对,进一步促进了SAR在冰川学中的应用^[36].随后发射的ENVISAT、ALOS卫星波段等也被成功应用于冰川研究中,周建民等^[37]采用ENVISAT卫星携带的C-band的ASAR和ALOS卫星携带的L-band的PALSAR数据,成功提取了内陆冰川的相关参数.

2 冰川信息提取方法的发展

从信息提取的角度出发,冰川信息提取方法分为目视解译和计算机自动分类.目视解译精度比计

算机自动分类精度高,但是目视解译工作量大、周期较长、耗时耗力,中国历时 22 年才完成中国第一次冰川编目。但由于其精度较高,在冰川提取中也经常被采用。计算机自动分类虽能快速获取大尺度冰川区域的信息,但最终需要目视解译辅助来提高自动分类的精度,尤其对于表碛覆盖冰川的自动识别。目前,常规的计算机自动提取冰川方法主要有阈值统计法、非监督和监督分类、主成分分析法、波段比值法、雪盖指数法。国内外冰川变化研究也多采用常规的冰川自动识别方法。随着遥感技术的发展和冰川提取问题的出现也引入了一些新的冰川自动提取方法,但是仍然没有一种方法适用于所有地区冰川的提取,所以发展更加先进的冰川提取方法是冰川研究的重要方向和趋势。

2.1 常规的冰川自动提取方法

常规的方法大都是基于像素,根据地物的光谱差异来进行分类的,利用冰川在可见光/近红外波段的高反射率和中红外波段的强吸收性,通过增强冰川与其他地物的光谱差异来提取冰川信息。

(1) 阈值统计法是基于一种经验统计的方法。其原理是基于冰雪的反射特性与其他地物的差异,确定冰川在图像上的亮度阈值。但因时相、大气传输、地形等诸多因素的影响,同一地区几乎每一景图像冰雪的阈值都不尽相同。同时,大面积的云盖将使得阈值像元的统计产生较大误差。阈值法像元统计只是在卫星遥感应用的早期以及当数据不完整时使用^[38]。

(2) 非监督分类和监督分类是最常用的分类方法。非监督分类方法简单,不需要更多的先验知识,根据地物的光谱统计特性来进行分类^[34]。Ye 等^[39]采用非监督分类方法监测各拉丹冬冰川 1969—2002 年的变化,认为分类精度与影像分辨率与拍摄季节有关。

监督分类从研究区选取有代表性的训练场地作为样本,根据已知训练区提供的样本,通过选择特征参数(如像素亮度均值、方差等),建立判别函数,据此对样本像元进行分类,依据样本类别的特征来识别非样本像元的归属类别^[34]。李震等^[40]采用监督分类和非监督分类提取青藏高原冰川变化,结果表明监督分类精度明显高于非监督分类,但是部分积雪和岩石被错分。

(3) 雪盖指数法是植被指数在积雪制图的延伸和推广,它也是将冰雪在可见光的强反射和近红外低反射波段进行归一化处理,以突出冰雪的特性,公式如下:

$$NDSI = (CH_n - CH_m) / (CH_n + CH_m) \quad (1)$$

式中: n, m 分别为可见光和近红外波段号。如 TM 的 2 波段和 5 波段, ASTER 的 1 波段和 4 波段。上官冬辉等^[41]在利用雪盖指数方法提取不同时期玉龙喀什河源区的冰川分布中发现,雪盖指数缺点是冰川的表碛分布区及积雪覆盖区域很难识别,最后需要目视解译来进行修正。

(4) 波段比值法可用波段图像的数字数值(DN 值),也可以用行星反射率或经大气校正的反射率作比值运算^[42]。Landsat TM 影像一般选用波段 TM3 或 TM4 与 TM5 的比值, ASTER 影像选用 band3/band4 进行运算。1987 年 Hall 等^[43]首先尝试采用 TM4/TM5 方法区分冰雪;随后 Rott 等^[44]分别采用 TM3/TM5 和 TM4/TM5 提取冰雪,阴影区 TM3/TM5 提取结果比 TM4/TM5 好,而在非阴影区 TM4/TM5 提取结果更好。

(5) 主成分分析法是基于图像信息增强的角度对冰川信息进行增强处理,这种方法最终仍需要结合非监督分类、监督分类、雪盖指数等分类方法达到对冰川信息的快速提取^[45]。张明华^[46]以 Landsat-7 ETM+ 信息源,以图像统计量为基础,以 TM5、7 波段为重点,用不同波段组合进行了基于 K-L 变换的冰川信息分离、提取研究,取得了满意的效果。他认为前人研究只注重冰雪在不同波段的光谱差异及在可见光波段的高反射率,而忽视了图像的相关性。

2.2 冰川自动识别新方法

(1) 面向对象分析法随着高分辨率影像的产生应运而生,高空间分辨率影像地物的结构、纹理等信息较丰富,局部异质性较大,如果采用传统的基于像元的方法,不能真正发挥高分辨率影像的优势,从而造成信息提取精度降低和资源的浪费。20 世纪 90 年代以来,国外学者从图像分割单元或斑块的角度对遥感分类方法进行了探索性研究,取得了一些进展。例如, Lobo 等^[47]的每地块(Per-field)方法, Aplin 等^[48]的每斑块(Per-Patch)分类方法。面向对象技术在空间信息技术长期发展的过程中迅速发展起来,它突破了传统的遥感分类方法基于像元信息提取的局限性,顾及了更多的结构、特征、纹理等信息,避免了同一地物内部异质性增强导致的“椒盐现象”的产生^[49-50]。龚剑明等^[51]、聂勇等^[52]、张继平等^[53]都运用面向对象的图像信息自动分析方法对冰川信息进行了提取研究,获得了高质量的分类精度。张继平等^[53]利用冰川运动留下的特殊纹理,提高了冰川与积雪的区分精度,但对于冰舌部分,虽进行反复设置

与试验, 仍没有较准确地提取出冰舌信息, 主要是与冰舌尾部两侧的裸岩混淆较大。

(2) 合成孔径雷达干涉测量技术(INSAR)。INSAR 技术是在合成孔径雷达(SAR)基础上发展起来, 被广泛应用于地形测绘、土地利用、冰川研究等多个领域。INSAR 是通过重复轨道雷达信号的相位差信息和相干性特征来探测地表覆盖^[54-55], 它要求所获取的相同地区的数据之间必须具有一定的相干性, 才能提取有效信息开展进一步的分析应用^[56]。冰川的表面因冰雪的融化、冰川运动很难保持相干性, 利用它的失相干特性可以把它与周围地物区别开来。李震等^[56]通过比较重复轨道 ERS-1/2 的 SAR 图像, 利用地物的散射强度和 SAR 重复轨道的相干度测量, 进行雪盖划分的方法研究, 分类精度达到 82%。周建民等^[57]基于 SAR 干涉失相干特性的方法, 采用阈值法对冰川区域的干涉相干图进行冰川边界的提取, 提取冰川边界的精度达到 89%, 但在冰川的末端位置冰川边界提取的效果不是很理想。利用 SAR 数据进行冰川边界判断, 除了利用多景的干涉相干性以外, 随着多极化数据的提供, 利用单景 SAR 图像的极化信息也可进行冰川边界信息的提取^[58]。

2.3 冰川信息提取方法的综合评价

国内外一些学者通过比较不同冰川自动识别方法, 力图寻求最有效的自动提取方法。例如, Sidjak^[59]利用不同波段的组合作为监督分类的输入波段进行冰川提取, 分别采用了 TM345 彩色合成、TM4/TM5、NDSI、PC2-4、PC1-4, 研究结果显示只有 PC2-4、TM4/TM5 和 NDSI 的组合方法能很好的处理阴影区和表碛覆盖冰川。Paul^[60]对监督分类、非监督分类、NDSI、TM3/TM5 和 TM4/TM5 自动识别冰川结果进行了比较, 发现只有 TM4/TM5 方法能有效地识别阴影下的冰川, 然而所有的方法都不能正确识别表碛覆盖冰川。上官冬辉^[45]分析了不同方法对不同类型的冰川提取的精度, 尽管不同分类方法在识别不同类型冰川区表现各异, 但 TM3/TM5 或 TM4/TM5 的精度是最高的, TM3/TM5 能很好的识别薄雪; 监督和非监督分类识别结冰的水体具有优势, 但不能识别阴影下的冰川, NDSI 对阴影下的冰川识别精度不高, 此外, 还采用了 K-L 变换提取信息, 发现它可用于表碛覆盖冰川区域的增强, 但难于识别阴影下的冰川。李治国等^[61]发现 TM3/TM5 提取浓阴影和少量表碛覆盖的冰川较之 NDSI 和 TM4/TM5 效果好, 但仍然无法提取厚表碛覆盖的冰川。张世强等^[62]、许君利等^[63]也分别对比了几

种方法的提取结果, 同样得出比值法的精度是最高的结论。然而宋波等^[64]在海洋性冰川的提取研究中, 认为 NDSI 指数法的效果优于比值法。这也许由于大陆型和海洋型冰川差异所致。

不同的冰川自动识别方法表现各异, 有各自的优缺点。监督和非监督分类精度低, 无法处理有云、积雪、阴影区的冰川, 更无法处理表碛覆盖的冰川; 非监督分类的错分现象更加严重, 监督和非监督分类适合无云、无积雪的裸冰区域的冰川提取。NDSI 不能有效识别阴影下的冰川^[45, 60, 62-63], 会错分部分水体。波段比值法能准确提取阴影下冰川, 但也会错分部分积雪与水体。许多研究结果显示, 传统分类方法中波段比值法的总体精度是最高的^[45, 60-61, 65-67]。NDSI 和波段比值法对裸冰提取效果很好, 选择无云、夏季消融期末影像可以避免部分积雪的影响, 但依然难于表碛覆盖冰川。由于表碛覆盖冰川与岩石, 冰川与季节性积雪光谱相似, 利用常规的自动提取方法很难将它们区分开来。

面向对象分析法综合考虑形状、纹理、结构特征等信息, 而且可以引入 DEM、水体指数、波段比值等多种因子, 在一定程度上提高了积雪、水体与冰碛物识别的精度。但该方法也不能准确提取冰舌及冰川末端信息, 且其关键技术图像分割的尺度会根据不同影像、不同地区有所不同, 需要经过目视解译反复的试验与调试, 具有一定的主观性。SAR 数据对地表有一定的穿透能力, 可以提高表碛覆盖冰川识别的精度, 但也不能完全准确提取冰川末端信息。采用 INSAR 应尽可能考虑空间和时间的去相干问题, 应尽可能选取时间间隔较长, 在间隔期内冰川运动变化很大, 而其他地物变化不大的影像^[57]。SAR 数据有丰富的纹理信息, 光学遥感数据具有丰富的光谱信息, 应将微波数据与光学数据相融合, 将各种方法的优点相结合, 发展更先进的冰川自动识别方法。

NDSI 和波段比值法可以有效的提取阴影区以及部分薄冰碛物, 面向对象方法和雷达干涉测量在避免积雪、水体、阴影和冰碛物影响方面都有所提高。但冰碛物识别仍是难点, 研究显示目前所有方法都无法准确提取表碛覆盖冰川的边界, 尤其是厚表碛覆盖冰川。

2.4 表碛覆盖冰川的自动识别

在冰川解译过程中, 由于裸地与表碛覆盖、季节性积雪与冰川的光谱特性相似, 因此, 如何正确识别表碛覆盖与季节性积雪是难点^[40-41, 60, 68-69]。对于季节性积雪, 应尽量选择夏季消融期末的影像; 而对表

冰覆盖冰川,大部分研究采用了目视解译方法。然而对于大范围表冰覆盖冰川来说,迫切需要发展表冰覆盖冰川的自动分类方法,针对表冰覆盖冰川,国内外学者也提出了一些自动、半自动的方法。

Paul 等^[68]提出用 ASTER 影像结合 DEM 的半自动方法识别瑞士阿尔卑斯山表冰覆盖的冰川;宋波等^[64]在 Paul 等^[68]方法的基础上,提出一种经过改进的更加完备的半自动集成分类方法,该方法充分利用不同地物光谱特性的差异(选取 NDSI、NDVI 作为分类指标)和 DEM 的地形特征分析手段(反演坡度和曲率变化信息),并结合热红外波段 TM6 对地表温度的探测能力,实现了对冰川区图像的半自动分类,取得了较好的分类结果。宋波等^[64]认为此方法比 Paul 等^[68]提出的方法更适合于我国海洋型冰川的遥感研究。上官冬辉^[45]选择基于知识库分类法,探索对天山科其卡尔表冰覆盖区的冰川信息进行提取的方法。该方法充分考虑 TM3/TM5、坡度、NDVI、冰面温度等要素,与目视解译结果比较,表冰覆盖区的冰川边界识别总体正确率为 90%。蒋宗立^[70]采用 ALOS/PALSAR 数据的干涉相干性判断科其卡尔表冰覆盖型冰川边界的可行性与不确定性,并用实地测量数据进行对比验证。结果显示,选择夏季的 ALOS/PALSAR 资料进行相干性估计,与现场观测的 GPS 数据边界比较吻合。这些方法在各自的研究区中虽然取得了很好的效果,但目前对表冰覆盖冰川边界的提取尚未有通用的、较成熟的方法^[71],发展更为先进的自动识别表冰覆盖冰川的方法自动提取依然是冰川未来研究的重要方向。

3 冰川信息提取精度的验证

对遥感解译结果的检验可通过两种途径达到,一种方法是通过地面实况调查获得;另一种方法是用更高空间分辨率的遥感数据分类结果作为参考数据^[45]。由于冰川地区的地形复杂、气候险恶,许多地方难以到达,难以实现冰川区域的全面考察,冰川变化的实地测量也只能在典型区域开展。所以,对于冰川信息提取精度的验证,只有部分冰川地区采用实地测量数据验证,大部分学者则都是采用目视解译或与冰川编目数据、高分辨率影像解译结果进行比较验证。张国梁等^[72]将解译的冰川边界和野外实地考察与 GPS 测量进行对比验证,由于影像与调查时间存在时间差,边界对比存在一定的误差。上官冬辉等^[73]将获取的冰川边界与完全来自

目视解译的冰川比较,采用基于冰川面积量测百分比的抽样检验的方法进行自动解译,由于受雪和山地阴影的影响,精度约为 79.2%。Paul^[74]将 TM3/TM5 和 TM4/TM5 提取结果与 SPOT 影像上人工提取冰川边界相比较,发现 TM4/TM5 识别冰川面积最准确,仅比 SPOT 人工测量少 2.3%。检验自动识别精度最有效的途径是实地测量,但冰川地形的特殊性决定了地面实测数据难以获取,部分冰川提取结果只能采取目视解译或与冰川编目数据进行验证。目视解译需要有丰富专业知识和野外实践经验,也存在一定的人为主观因素;利用冰川编目数据进行验证,数据容易出现移位,定位不准确,对冰川面积的估算产生误差。以高分辨率影像作为参考数据,由于冰川的运动性,需要选择相同时相的高分辨影像和夏季消融期末的影像,以减少多时相影像的差别和积雪对冰川识别的检验。总之,冰川信息提取的精度检验面临着重要的挑战,也是目前冰川研究存在的重要问题。

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 冰川信息提取已发展了多种自动识别方法,对于无表冰冰川,传统方法中普遍认为波段比值法的精度是最高的。但由于冰川类型、影像空间分辨率、影像质量及研究区域的不同,每种方法也都有自己的适用性。面向对象方法突破传统的限制,对影像进行分割,避免了内部异质性现象的产生,提高了冰川识别的精度。SAR 数据能穿透表层和云层,选取合适的波段对,利用冰川的干涉特性成功提取冰川信息。对于表冰覆盖冰川,国内外学者也尝试提出了一些自动、半自动的方法,表冰覆盖冰川的自动识别尽管已取得了一些研究成果,但各种方法只适用各自研究区,不能进行大尺度的自动识别。

(2) 积雪、冰碛物、云层是影响冰川提取精度的重要因素。合适的影像能够提高冰川提取精度,选择夏季消融期末的影像和微波数据能够减少积雪和云的影响,但在实际数据选择上,往往难于做到,即便是消融期末,往往因部分山地常年下雪,使得季节性积雪与冰川相邻,增加了积雪与冰川的识别难度^[45]。微波数据不受云层影响,全天候及部分穿透性的能力是高山地区冰川研究的最佳资料选择。

(3) 冰川信息提取精度验证也是存在的重要问题。冰川复杂的地形以及恶劣的天气决定了对冰川进行全面的实地测量和对比是不可能实现的,野外

考察只能在典型的冰川区域进行。大部分研究采用目视解译方法以及冰川编目进行验证, 目视解译受人为主观因素影响, 一定程度上影响精度的评价; 冰川编目是冰川研究的重要基础数据, 但冰川编目历时时间长, 不能及时提供验证信息, 而且不同时期数据间容易出现移位, 定位不准确。因此, 在资源与条件允许下应进行更多的野外考察, 减少因遥感影像及人工干扰带来的不确定因素, 建立不同类型冰川的解译标志, 对解译过程中出现的疑难点、难以判读的地方进行野外验证, 尽量提高冰川自动提取的精度。

4.2 展望

(1) 多种冰川自动识别方法有各自的适用范围和局限性, 未来研究中应综合更多的信息, 或将多种方法的优点相结合, 发展更高精度、更普遍适用的自动识别方法。影像选择也是影响信息提取的重要因素, 有必要将光学遥感丰富的多光谱信息与微波遥感的优势相结合, 优势互补、改善图像的空间分辨率和光谱信息, 提高冰川自动识别的精度。

(2) ICESA 激光脉冲返回的波形能够区分地表不同类型, 由于地表粗糙度、坡度、反射率等不同, 返回脉冲的波峰个数、波形宽度、波形能量等参数也不同, 根据波形参数判定地表土地类型。ICESAT 数据的这一优势可以用于冰川监测中, 利用波形参数提取冰川信息, 更好的区分冰川与积雪。

(3) 粗糙集理论是一门新兴的不确定性处理理论和全新数学工具, 适合于不完整、不确定知识和数据的表达、学习和归纳。遥感信息在数据采集、处理、分析、数据转换等各种操作中, 都会引入不同类型和不同程度的不确定性, 并在随后的各种处理过程中传播, 应用不确定性理论和方法研究遥感信息的处理、分析和结果评估是当前遥感信息智能处理领域的主流研究趋势之一^[75]。利用粗糙集理论进行冰川信息提取是未来方法研究的一个新方向。

参考文献 (References):

- [1] Qin Dahe, Chen Yiyu, Li Xueyong. Climate and Environment Change in China (Vol. I): Climate and Environment Evolution and Prediction[M]. Beijing: Science Press, 2005: 109—110. [秦大河, 陈宜瑜, 李学勇. 中国气候与环境演变(上卷): 气候与环境的演变及预测[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 109—110.]
- [2] Shi Yafeng, Liu Chaohai, Wang Zongtai, *et al.* Concise Glacier Inventory of China [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005. [施雅风, 刘潮海, 王宗太, 等. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.]
- [3] Lemke P, Ren J, Alley R B, *et al.* Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground[M]//Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 337—383. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter4.pdf>.
- [4] Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, *et al.* Sea level budget over 2003—2008: a reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo[J]. Global and Planetary Change, 2009, **65**(1—2): 83—88.
- [5] Cazenave A, Lombard A, Llovel W. Present-day sea level rise: A synthesis [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2008, **340**(11): 761—770.
- [6] Ren Jiawen, Ye Baisheng, Ding Yongjian, *et al.* Initial estimate of the contribution of cryospheric change in China to sea level rise[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, **56**(16): 1661—1664. [任贾文, 叶柏生, 丁永建, 等. 中国冰冻圈变化对海平面上升潜在贡献的初步估计[J]. 科学通报, 2011, **56**(14): 1084—1087.]
- [7] Dyurgerov M B, Meier M F. Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2000, **97**(4): 1406—1411.
- [8] Oerlemans J, Fortuin J P F. Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming [J]. Science, 1992, **258**(5079): 115—117.
- [9] Haeberli W, Hoelzle M. Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps [J]. Annals of Glaciology, 1995, **21**: 206—212.
- [10] Shi Yafeng. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in West China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(4): 333—341. [施雅风. 2050 年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(4): 333—341.]
- [11] Pu Jianchen, Yao Tandong, Wang Ninglian, *et al.* Puruogangri ice field and its variations since the Little Ice Age of the Northern Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(1): 87—92. [蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 普若岗日冰原及其小冰期以来的冰川变化[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(1): 87—92.]
- [12] Liu Shiyin, Shen Yongping, Sun Wenxin, *et al.* Glacier variation since the maximum of the Little Ice Age in the Western Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(3): 227—233. [刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 227—233.]
- [13] Yang Daqing. On the mass balance of 50 mountain glaciers in the northern hemisphere [J]. Advances in Water Science, 1992, **3**(3): 161—165. [杨大庆. 北半球 50 条山地冰川近期的物质平衡状况[J]. 水科学进展, 1992, **3**(3): 161—165.]
- [14] Ju Yuanjiang, Wei Xia, Liu Gengnian. Statistics and analysis on the mass balance of Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2006, **29**(1): 76—80. [鞠远江, 魏遐, 刘耕年. 天山乌一号冰川物质平衡特征的统计分析[J]. 干旱区地理, 2006, **29**(1): 76—80.]
- [15] Gao Xiaoping, Tang Maocang, Feng Song. Discussion on the relationship between glacial fluctuation and climate change

- [J]. Plateau Meteorology, 2000, **19**(1): 9—16. [高晓清, 汤懋苍, 冯松. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨[J]. 高原气象, 2000, **19**(1): 9—16.]
- [16] Zhang Yinsheng, Yao Tandong, Pu Jianchen. The response of continental-type glaciers to climate change in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, **20**(1): 3—8. [张寅生, 姚檀栋, 蒲健辰. 我国大陆型山地冰川对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 1998, **20**(1): 3—8.]
- [17] Su Zhen, Shi Yafeng. Response of monsoonal temperate glaciers in China to global warming since the little ice age[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22**(3): 223—229. [苏珍, 施雅风. 小冰期以来中国季风温冰川对全球变暖的响应[J]. 冰川冻土, 2000, **22**(3): 223—229.]
- [18] Duan Jianping, Wang Lily, Ren Jiawen, *et al.* Seasonal variations in heavy metals concentrations in Mt. Qomolangma Region snow[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, **19**(2): 249—256.
- [19] Shi Yafeng, Liu Shiyin. Estimation on the response of glaciers in China to the global warming in the 21st century[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, **45**(7): 668—672. [施雅风, 刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估[J]. 科学通报, 2000, **45**(4): 434—438.]
- [20] Jiao Keqin, Jing Zhefan, Han Tianding, *et al.* Variation of the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains during the past 42 years and its trend prediction[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(3): 253—260. [焦克勤, 井哲帆, 韩添丁, 等. 42 a 来天山乌鲁木齐河源 1 号冰川变化及趋势预测[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(3): 253—260.]
- [21] Yao Tandong, Shi Yafeng. Climatic, glacial and runoff changes and the future tendency in Ürümqi River basin[J]. Scientia Sinica (Series B): 1988(6): 657—666. [姚檀栋, 施雅风. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势[J]. 中国科学 (B 辑), 1988(6): 657—666.]
- [22] Müller F, Cafilisch T, Müller G. Instructions for Compilation and Assemblage of Data for A World Glacier Inventory[R/OL]. Department of Geography, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 1977. http://www.wgms.ch/downloads/Mueller_et_al_UNESCO_1977.pdf.
- [23] Bindshadler R, Dowdeswell J, Hall D, *et al.* Glaciological applications with Landsat-7 imagery: Early assessments[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, **78**(1—2): 163—179.
- [24] Meier M F. Evaluation of ERTS imagery for mapping and detection of changes of snowcover land and on glaciers[C]// Symposium on Significant Results Obtained from Earth Resources Technical Satellite-1. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1973: 863—875.
- [25] Bishop M P, Olsenholler J A, Shroder J F, *et al.* Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS): remote sensing and GIS investigations of the Earth's cryosphere[J]. Geocarto International, 2004, **19**(2): 57—84.
- [26] Kieffer H, Kargel J S, Barry R, *et al.* New eyes in the sky measure glaciers and ice sheets[J]. EOS, Transactions American Geophysical Union, 2000, **81**(24): 265—271.
- [27] Kargel J S, Abrams M J, Bishop M P, *et al.* Multispectral imaging contributions to global land ice measurements from space[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, **99**(1—2): 187—219.
- [28] Kääb A, Paul F, Maisch M, *et al.* The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: II. First results[J]. Annals of Glaciology, 2002, **34**(1): 362—366.
- [29] Klein A G, Kincaid J L. Retreat of glaciers on Puncak Jaya, Irian Jaya, determined from 2000 and 2002 IKONOS satellite images[J]. Journal of Glaciology, 2006, **52**(176): 65—79.
- [30] Cullen N J, Mölg T, Kaser G, *et al.* Kilimanjaro Glaciers: Recent areal extent from satellite data and new interpretation of observed 20th century retreat rates [J]. Geophysical Research Letters, 2006, **33** (16), DOI: 10.1029/2006GL027084.
- [31] Liu C C, Chang Y C, Huang S, *et al.* Monitoring the dynamics of ice shelf margins in Polar Regions with high-spatial-and high-temporal-resolution space-borne optical imagery [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, **55**(1): 14—22.
- [32] Racoviteanu A E, Williams M W, Barry R G. Optical remote sensing of glacier characteristics: a review with focus on the Himalaya[J]. Sensors, 2008, **8**(5): 3355—3383.
- [33] Narama C, Kääb A, Duishonakunov M, *et al.* Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (—1970), Landsat (—2000), and ALOS (—2007) satellite data[J]. Global and Planetary Change, 2010, **71**(1—2): 42—54.
- [34] Mei Anxin, Peng Wanglu, Qin Qiming, *et al.* Introduction of Remote Sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. [梅安新, 彭望球, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.]
- [35] Goldstein R M, Engelhardt H, Kamb B, *et al.* Satellite radar interferometry for monitoring ice-sheet motion: Application to an Antarctic ice stream[J]. Science, 1993, **262**(5139): 1525—1530.
- [36] Shu Ning. Principle of SAR Interferometry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. [舒宁. 雷达影像干涉测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.]
- [37] Zhou Jianmin, Li Zhen, Li Xinwu. A comparative study of coherence patterns of C-band and L-band interferometric SAR in western glacier areas[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2009(2): 9—13, 18. [周建民, 李震, 李新武. C-band 和 L-band 雷达干涉数据西部冰川区域相干性对比分析[J]. 国土资源遥感, 2009(2): 9—13, 18.]
- [38] Wang Jian. Comparison and analysis on methods of snow cover mapping by using satellite remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1999, **14**(4): 29—36. [王建. 卫星遥感雪盖制图方法对比与分析[J]. 遥感技术与应用, 1999, **14**(4): 29—36.]
- [39] Ye Q, Kang S, Chen F, *et al.* Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies[J]. Journal of Glaciology, 2006, **52**(179): 537—545.
- [40] Li Zhen, Sun Wenxin, Zeng Qunzhu. Deriving glacier change information on the Xizang (Tibetan) Plateau by integrating RS and GIS techniques [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, **54**(3): 73—78. [李震, 孙文新, 曾群柱. 综合 RS 与 GIS 方法提取青藏高原冰川变化信息——以布喀塔格峰为例[J]. 地理学报, 1999, **54**(3): 73—78.]
- [41] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, *et al.* Glacier changes at the head of Yurungkax River in the West Kun-

- lun Mountains in the past 32 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, **59**(6): 855—862. [上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 玉龙喀什河源区 32 年来冰川变化遥感监测[J]. *地理学报*, 2004, **59**(6): 855—862.]
- [42] Cao Meisheng, Li Xin, Chen Xianzhang, *et al.* Remote Sensing of Cryosphere [M]. Beijing: Science Press, 2006. [曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. 冰冻圈遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [43] Hall D K, Ormsby J P, Bindshadler R A, *et al.* Characterization of snow and ice reflectance zones on glaciers using Landsat Thematic Mapper data[J]. *Annals of Glaciology*, 1987, **9**: 104—108.
- [44] Rott H, Markl G. Improved snow and glacier monitoring by the Landsat Thematic Mapper[C]//Proceedings of a Workshop on Earthnet Pilot Project on Landsat TM Applications. European Space Agency, 1989, SP-1102: 3—12.
- [45] Shanguan Donghui. Glacier Changes in Tarim Interior River Basin using 3S[D]. PhD Thesis, Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2007. [上官冬辉. 基于 3S 的塔里木河流域冰川变化应用研究[D]. 博士论文. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.]
- [46] Zhang Minghua. Extracting the temperate glacier information in the Mount Namjagbarawa, Tibet Autonomous Region, based on ETM⁺ image[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(2): 226—232. [张明华. 基于 ETM⁺ 影像的西藏南迦巴瓦峰地区海洋性冰川信息提取[J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(2): 226—232.]
- [47] Lobo A, Chic O, Casterad A. Classification of Mediterranean crops with multisensor data: per-pixel versus per-object statistics and image segmentation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(12): 2385—2400.
- [48] Aplin P, Atkinson P M, Curran P. Per-field classification of land use using the forthcoming very fine spatial resolution satellite sensors: problems and potential solutions [C]//Advances in Remote Sensing and GIS Analysis. Chichester: Wiley, 1999: 219—239.
- [49] Walter V. Object-based classification of remote sensing data for change detection [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, **58**(3—4): 225—238.
- [50] Cao Bao, Qin Qiming, Ma Haijian, *et al.* Application of object-oriented approach to SPOT5 image classification: A case study in Haidian District, Beijing City[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, **22**(2): 46—49, 54. [曹宝, 秦其明, 马海建, 等. 面向对象方法在 SPOT5 遥感图像分类中的应用——以北京市海淀区为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2006, **22**(2): 46—49, 54.]
- [51] Gong Jianming, Yang Xiaomei, Zhang Tao, *et al.* Information extraction of glacier and its landform classes based on multi-feature remote sensing image combination[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, **11**(6): 765—772. [龚剑明, 杨晓梅, 张涛, 等. 基于遥感多特征组合的冰川及其相关地表类型信息提取[J]. *地球信息科学学报*, 2009, **11**(6): 765—772.]
- [52] Nie Yong, Zhang Yili, Liu Linshan, *et al.* Monitoring glacier change based on remote sensing in the Mt. Qomolangma National Nature Preserve, 1976—2006[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65**(1): 13—28. [聂勇, 张锦锂, 刘林山, 等. 近 30 年珠穆朗玛峰国家自然保护区冰川变化的遥感监测[J]. *地理学报*, 2010, **65**(1): 13—28.]
- [53] Zhang Jiping, Liu Linshan, Zhang Yili, *et al.* Object-oriented information extraction of water bodies and glaciers in extreme high altitude area: A case study of the core area of Mt. Qomolangma (Everest) National Nature Preserve[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2010, **12**(4): 517—523. [张继平, 刘林山, 张锦锂, 等. 面向对象的极高海拔区水体及冰川信息提取——以珠穆朗玛峰国家级自然保护区核心区为例[J]. *地球信息科学学报*, 2010, **12**(4): 517—523.]
- [54] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, *et al.* The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. *Nature*, 1993, **364**(6433): 138—142.
- [55] Michel R, Rignot E. Flow of Glaciar Moreno, Argentina, from repeat-pass Shuttle Imaging Radar images: Comparison of the phase correlation method with radar interferometry[J]. *Journal of Glaciology*, 1999, **45**(149): 93—100.
- [56] Li Zhen, Guo Huadong, Li Xinwu, *et al.* SAR interferometry coherence analysis and snow mapping[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, **6**(5): 334—338. [李震, 郭华东, 李新武, 等. SAR 干涉测量的相干性特征分析及积雪划分[J]. *遥感学报*, 2002, **6**(5): 334—338.]
- [57] Zhou Jianmin, Li Zhen, Xing Qiang. Deriving glacier border information based on analysis of decorrelation in SAR interferometry[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(1): 133—138. [周建民, 李震, 邢强. 基于雷达干涉失相干特性提取冰川边界方法研究[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(1): 133—138.]
- [58] Huang L, Li Z, Tian B S, *et al.* Classification and snow line detection for glacial areas using the polarimetric SAR image [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(7): 1721—1732.
- [59] Sidjak R W. Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(2): 273—284.
- [60] Paul F. The New Swiss Glacier Inventory 2000: Application of Remote Sensing and GIS[D]. PhD Thesis, Zurich, Swiss: Department of Geography, University of Zurich, 2004.
- [61] Li Zhiguo, Yao Tandong, Ye Qinghua, *et al.* Glaciers in the upstream Manla Reservoir in the Nianchu River Basin, Tibet: Shrinkage and impact[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(4): 650—658. [李治国, 姚檀栋, 叶庆华, 等. 西藏年楚河满拉水库上游冰川变化及其影响[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(4): 650—658.]
- [62] Zhang Shiqiang, Lu Jian, Liu Shiyin. Deriving glacier border information on Qinghai Tibet by TM high spectrum image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, **26**(5): 435—440. [张世强, 卢健, 刘时银. 利用 TM 高光谱图像提取青藏高原喀喇昆仑山区现代冰川边界[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, **26**(5): 435—440.]
- [63] Xu Junli, Liu Shiyin, Zhang Shiqiang, *et al.* Glaciers fluctuations in the Karamilan-Keriya River Watershed in the past 30 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(3): 312—318. [许君利, 刘时银, 张世强, 等. 塔里木盆地南缘喀拉米兰河克里雅河流内流区近 30 来的冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(3): 312—318.]
- [64] Song Bo, He Yuanqing, Pang Hongxi, *et al.* Identifying au-

- tomatically the debris-covered glaciers in China's monsoonal temperate-glacier regions based on remote sensing and GIS [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(3): 456—462. [宋波, 何元庆, 庞洪喜, 等. 基于遥感和 GIS 的我国季风海洋型冰川区冰碛物覆盖型冰川边界的自动识别 [J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(3): 456—462.]
- [65] Albert T H. Evaluation of remote sensing techniques for ice-arena classification applied to the tropical Quelccaya ice cap, Peru[J]. *Polar Geography*, 2002, **26**(3): 210—226.
- [66] Andreassen L M, Paul F, Kääb A, *et al.* Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s[J]. *The Cryosphere*, 2008, **2**(2): 131—145.
- [67] Paul F, Huggel C, Kääb A, *et al.* Comparison of TM-derived glacier areas with higher resolution data sets[C]//EARSeL Workshop on Remote Sensing of Land Ice and Snow, Bern, Switzerland, March 11—13, 2002. EARSeL eProceedings, 2003, **2**: 15—21. http://eproceedings.org/static/vol02_1/02_1_paul1.pdf
- [68] Paul F, Huggel C, Kääb A. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**(4): 510—518.
- [69] Wu Lizong. Space Integration of China Glacier Inventory and Glacier Inventory based on Landsat [D]. Master Thesis, Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2005. [吴立宗. 中国冰川编目空间集成和基于陆地卫星的冰川编目[D]. 硕士学位论文, 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2005.]
- [70] Jiang Zongli. Applying Space-borne SAR Technologies to Study Mass Balance of Mountain Glacier [D]. PhD Thesis, Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2011. [蒋宗立. 星载 SAR 技术在山地冰川物质平衡研究中的应用[D]. 博士学位论文, 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2011.]
- [71] Zhang Guoliang, Wang Jie, Pan Baotian, *et al.* Progress in research on glacier changes using remote sensing[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2010, **46**(6): 1—10. [张国梁, 王杰, 潘保田, 等. 冰川变化遥感监测的研究进展[J]. *兰州大学学报*, 2010, **46**(6): 1—10.]
- [72] Zhang Guoliang, Pan Baotian, Wang Jie, *et al.* Research on the glacier change in the Gongga Mountain based on remote-sensing and GPS from 1966 to 2008[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(3): 454—460. [张国梁, 潘保田, 王杰, 等. 基于遥感和 GPS 的贡嘎山地区 1966—2008 年现代冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(3): 454—460.]
- [73] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, *et al.* Monitoring glacier changes and inventory of glacier in Muztag Ata-Kongur Tagh, East Pamir, China, uses ASTER data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(3): 344—351. [上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 利用 ASTER 影像对慕士塔格-公格尔山冰川解译与目录编制[J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(3): 344—351.]
- [74] Paul F. Changes in glacier area in Tyrol, Austria, between 1969 and 1992 derived from Landsat 5 Thematic Mapper and Austrian Glacier Inventory data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(4): 787—799.
- [75] Wu Zhaocong. Rough Sets Approach to Remote Sensing Image Processing and Classification [D]. PhD Thesis, Wuhan: Wuhan University, 2004. [巫兆聪. 粗集理论在遥感影像分类中的应用[D]. 博士论文, 武汉: 武汉大学, 2004.]

Study of Extracting Glacier Information from Remote Sensing

YAN Li-li^{1, 2}, WANG Jian¹

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, remote sensing satellites, sensors used in monitoring glacier change and methods of extracting glacier information are summarized. Various approaches are evaluated synthetically. It is considered that the method of band ratio is the best among the conventional methods. The new methods of object-oriented classification and SAR interferometry have improved the accuracy of extracting glacier information to a certain extent. However, supraglacial debris is still a difficulty in automatic recognition of glacier informa-

tion. Automatic and semi-automatic methods have been developed for debris-covered glaciers. However, the methods are immature and out of universality. Obstacles of snow cover and supraglacial debris and hard ground verification of glacier information derived from satellite images still need to overcome. Therefore, to develop more advanced and more sophisticated methods will be an important issue in glacier research. It is expected that rough set theory and waveform of ICESAT satellite will improve the accuracy of extracting glacier information.

Key words: remote sensing; band ratio; snow cover; debris-covered glacier; object-oriented classification; SAR interferometry