

遥感技术在现代冰川变化研究中的应用

曹 泊,王 杰,张 忱,张国梁,潘保田

(兰州大学西部环境教育部重点实验室,西部环境与气候变化研究院,甘肃 兰州 730000)

摘要:传统的现代冰川变化研究主要以实地观测和经验公式来获得冰川的面积变化、体积变化和冰川表面运动速度,从 20 世纪 80 年代以来随着航空遥感光学图像、数字高程模型、雷达等新技术数据的不断出现和发展,借助遥感手段研究冰川的性质和特征、监测冰川的动态变化成为冰川学研究发展的重要趋势,也有效解决了现代冰川研究中高山区资料受限等问题。冰川面积变化的计算机自动解译方法主要有阈值法和雪盖指数阈值法、监督分类非监督分类法、比值阈值法等。阈值法和雪盖指数阈值法操作简单,但是在阈值选取方面不好把握;非监督分类法操作简单但限制因素较多;如果训练区选择准确,监督分类法分类结果比较精确;波段比值阈值法操作相对简单,精度准确,是目前运用最多的计算机自动分类方法。数字高程模型和雷达数据在冰川体积变化研究中的应用,较好地提高了传统方法的精度和适用性;而且雷达数据具有不受大气传播和气候影响的特点,很好地弥补了遥感光学影像数据极易受云雪等影响的不足。高精度 GPS 和雷达数据的不断发展和应用在冰川表面运动速度的研究中起着不可替代的作用。

关 键 词:现代冰川;遥感;计算机自动分类;雷达

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2011)01-0052-08

1 引 言

IPCC 第 4 次评估报告^[1]指出过去 100 a 来全球地表温度升高 0.74℃,全球变暖幅度自 1990s 以来明显加速,而高山区的冰川变化也正是气候变化的最好天然指示剂^[2]。故研究高山冰川变化对全球变暖的响应也愈来愈广泛。20 世纪 80 年代前现代冰川研究方法是依靠实地测量并借助于航空相片和经验公式来研究冰川变化^[3-4]。随着中国冰川研究逐渐和国际接轨,中国也在西部山区设立了许多冰川观测站,如天山乌鲁木齐河源 1 号冰川、唐古拉山小冬克玛底冰川以及昆仑山东段煤矿冰川等,使得许多地区都有了逐年观测资料。这种方法得到的数据连续、测量精度准确,但是有一定的局限性,需要大量的人力,也不能大面积观测,而且典型性冰川的变化是否具有普遍意义,是否能代替大面积冰川的变化趋势我们不得而知,所以学者们迫切寻找更简

单,能大范围地运用于现代冰川研究中的新方法。随着航天卫星技术的不断发展,研究者们把目光投向了卫星遥感数据。

借助遥感手段研究冰川的性质和特征、监测冰川的动态变化是 20 世纪 80 年代以来冰川学研究发展的重要趋势^[5-9]。众多研究者利用卫星遥感数据的参数特点,研究出多种不同的方法。在这些方法中选用最多的光学数据就是 Landsat 卫星遥感影像,Landsat 是依据“陆地资源卫星”计划,美国在 1972 年 7 月发射的第一颗地球资源卫星,到现在共成功发射了 6 颗卫星,目前只有 1984 年发射的 Landsat5 和 1999 年发射的 Landsat7 仍在运行,除了 Landsat 卫星影像还有 ASTER、SPOT、ALOS 等卫星也备受学者们的青睐,雷达数据也被广泛地应用于冰川研究中。本文系统地分析对比和总结了这些新方法在现代冰川面积、体积变化和冰川运动速度研究中的应用。

收稿日期:2010-06-04;修订日期:2010-10-20

基金项目:科技基础性工作专项项目(2006FY110200)、甘肃省科技支撑计划项目(0708NKCA122)、国家杰出青年科学基金项目(40925001)、国家基金委创新研究群体科学基金(40721061)资助。

作者简介:曹泊(1986—),男,江苏连云港人,博士研究生,主要从事现代冰川变化研究。E-mail:caobo04@lzu.cn。

2 冰川面积变化的研究

国内外依据航空遥感数据对现代冰川面积变化的研究很多,研究过程中采用的方法也有很多种。根据其 对遥感影像数据的处理方法可分为两大类:① 目视解译;② 计算机自动分类。

2.1 目视解译

在专家指导的基础上对航空相片或卫星影像上的冰川信息进行目视解译而获取其边界信息。该方法精度高,操作相对简单,但要耗费大量的人力物力,有时会因个人主观因素而误判冰川区,所以在目视解译时需要至少 3 名相关专业人员协助完成,对意见不一致区域集中讨论提取冰川区^[10]。

Jacobs 等^[11]根据 1961 年利用航空相片生成的 1:50 000 地形图和 1993 年 Landsat5 TM 影像运用目视解译的方法对加拿大 Barnes 冰帽进行研究,发现此处冰川末端以平均 4 m/a 的速率退缩。晋锐等^[12]运用目视解译的方法对西藏朋曲流域冰川边界进行提取,结果显示西藏朋曲流域 2000 年冰川总面积为 1 330.6 km²,相比于 20 世纪 70 年代面积减少了 9%。

2.2 计算机自动分类法

目前主要的计算机自动分类法有:阈值法和雪盖指数阈值法、监督分类和非监督分类法、比值阈值法、主成分分析法、谱间关系法等。

2.2.1 阈值法和雪盖指数阈值法

阈值法是基于冰川的反射特性与其他地物的差异,即研究者通过选取一定的阈值大小,来区分冰川区和非冰川区。由于 Landsat TM2 波段(0.52~0.60 μm)最有利于目视解译冰川的边界。所以学者大都选用 2 波段(表 1)进行阈值法,如张世强^[13]曾试用阈值为 200 来作为冰川边界,即波段灰度值(DN)大于 200 为冰川区,又用 60 作为非冰川区边界,也就是灰度值小于 60 为非冰川区。这种方法虽

然简单,但是很难有效地将冰川区与非冰川区划分出来,特别是在有表碛覆盖的污化雪和冰舌部分。

雪盖指数阈值法是植被指数的推广,主要是基于冰川在 2 波段的强反射和 5 波段的强吸收特性,其运算公式为(1):

$$NDSI = (TM2 - TM5) / (TM2 + TM5) \tag{1}$$

这里 NDSI 是雪盖指数,这种方法比直接用阈值法要精确且可靠,但是在选取阈值方面却很难把握。Hall 等^[14]依据 Landsat 和 IKONOS 卫星数据利用雪盖指数法对阿尔卑斯山的 Pasterze 冰川进行了分析,发现 Pasterze 冰川末端从 1984~2000 年退缩了 303 m,这与地面监测数据 290 m 比较接近,误差为 4%。但是他在文中也未提及准确阈值的选取问题。

2.2.2 非监督分类与监督分类

非监督分类是在没有先验知识的情况下,根据影像上地物光谱特征的分布规律将其自动分类,也就是根据影像本身的统计特征及自然点群的分布情况来划分地物类别的分类处理。此方法全程几乎不要人为干涉,但是精度很低,适用于无云、无表碛覆盖、雪盖较少的冰川,由于此方法限制性因素很多,很少用于实践当中。Aniya 等^[15]曾运用非监督分类法的 ISODATA 对南美 Patagonia 冰原的冰川参数信息进行了编目。

监督分类是使用者对遥感影像上部分位置的地物类别已明确,使用者依据经验建立训练样本,通过学习获得的以分类判别函数为理论基础的分类方法。此方法的分类结果在雪盖和污化雪部分还可以区分冰川与非冰川,但是在冰舌部分,容易和阴影部分混淆。Sidjak 和 Wheate^[16]对加拿大 Illecillewaet 冰原冰川进行冰川编目,运用监督分类的最大似然法提取冰川边界,并与雪盖指数法、波段比值法相比较后,认为在 Illecillewaet 冰川区监督分类方法能准确地区分冰川区与非冰川区。李震等^[17]以 Landsat RBV(1973 年)、Landsat MSS(1976 年)、Landsat TM(1987 年,1994 年)遥感资料再加上 1:50 000 地形图为信息源,运用监督分类和非监督分类的方法提取了昆仑山脉中段布喀塔格峰冰川的边界,结果表明在准确选择训练区的情况下,监督分类的准确度明显高于非监督分类,但部分积雪和岩石易被错分,故还应采用人工目视解译对错分的区域进行纠正。

2.2.3 比值阈值法

比值阈值法是先利用波段比值生成比值图像,

表 1 Landsat 5 卫星波段范围和波段分辨率

Table 1 The band range and resolution of Landsat 5

波段号	波段范围/μm	波段名称	分辨率/m
1	0.45~0.53	蓝绿色	30
2	0.52~0.60	绿色	30
3	0.63~0.69	红色	30
4	0.76~0.90	近红外	30
5	1.55~1.75	短波红外	30
6	10.4~12.5	热红外	120
7	2.08~2.35	短波红外	30

再根据阈值提取冰川范围的方法,比值图像在一定程度上能消除同物异谱现象,即可以识别部分阴影区冰川。基本原理是利用冰川在可见光波段的强反射率和在近红外波段的强吸收特性来提取冰川区与非冰川区。比值图像既有运用波段灰度值(DN)进行比值^[18],也有运用行星反射率进行比值^[19]。对于 Landsat 卫星影像, TM3/TM5 和 TM4/TM5 是两个较好的波段比值组合。ASTER 影像一般选用 3 波段($0.76\sim0.86\mu\text{m}$)与 4 波段($1.60\sim1.70\mu\text{m}$)进行比值。

Paul 等^[20]以 1985 年 Landsat TM 遥感图像作为数据源,在瑞士选取 $15\text{ km}\times15\text{ km}$ 范围作为试验区,对 4 种研究方法进行了比较,分别是:① 运用灰度值进行波段比值;② 运用行星反射率进行波段比值;③ 运用非监督分类的 ISODATA 法;④ 运用监督分类最大似然法。最终得出结果运用 DN 值的 TM4/TM5 的波段比值阈值法相比于其他 3 种方法更为精确。另外,有很多研究者也运用 TM3/TM5 的波段组合来提取冰川信息,如 Narama 等^[21]运用 Landsat 卫星对吉尔吉斯斯坦 Terskey-Alatoo 地区的冰川进行研究时,选用了 TM3/TM5 波段组合进行波段比值计算,结果显示此处冰川面积从 1971 年的 245 km^2 退缩为 2002 年的 226.6 km^2 。

比值阈值法运用非常广泛且受大多数研究者认同,但是对于阈值的选取,不同的研究者有不同的取值。Shangguan 等^[22]在东帕米尔地区做现代冰川调查时运用 TM3/TM5 波段组合,选取阈值为 2.1;在中国西昆仑山现代冰川调查时虽改用 TM4/TM5 波段组合,但选取的阈值依然是 2.1^[23]。而 Bolch^[24]在运用 TM4/TM5 波段分析北天山现代冰川变化时,选用阈值为 2,曹泊等^[10]在祁连山东段冷龙岭现代冰川研究中选用的阈值为 2.3,Paul 等^[25]在挪威 Svartisen 地区选用 TM3/TM5 的波段组合提取冰川边界时,选用阈值为 2.6。

不同研究者选取的阈值虽然不一样,但是相差不大,都是略大于 2,可见这种方法的实用性比较好。阈值的略有不同可能与影像的质量和冰川的类型有关,因为影像在云雪干扰的情况下波段 DN 值会与没有云雪干扰下的 DN 值不同;另外,海洋性冰川和大陆性冰川的反射率也有些许的差别,这样影像的 DN 值也会有所不同,导致在做比值运算时会出现差异,当然也不能排除人为主观因素的干扰。因此在做计算机自动分类时所选用的影像必须是无云雪干扰的,但是这样的数据在高山冰川区

很难获取。

3 冰川体积变化的研究

近年来山地冰川以变薄退缩的基本模式响应着气候变暖,而冰川体积的变化是由厚度和面积两个参数反映的。目前,主要有两种方法来获取冰川的厚度变化:① 利用遥感光学影像生成数字高程模型(DEM),获取冰川厚度变化;② 运用雷达数据直接测量冰川厚度。

3.1 遥感影像生成 DEM

传统的冰川厚度变化研究主要是通过花杆实地测量,这种方法获得的数据精度高且数据连续,但是实地观测数据具有特定的局限性,制约着冰川厚度变化的大面积研究。随着遥感技术的发展,通过遥感图像生成 DEM 已成为可能,弥补了传统研究的不足。

美国国家航空及太空总署 Terra 卫星搭载的先进星载热发射和反辐射计传感器(ASTER)有在单条轨道上获取近红外立体影像数据的能力。ASTER 传感器有两个镜头,一个向下观测,一个向后观测,其立体成像基高比为 0.6,空间分辨率为 15 m 。可以通过两张不同时相的 ASTER 影像,提取出不同时相的冰川高度,即可得到冰川厚度变化信息,也可以依据一张 ASTER 影像和精度可靠的地形图数据,得到不同时间段的冰川厚度变化^[26]。SPOT 数据也同样携带了高程信息,而且精度较 ASTER 更为精确。众多学者曾成功地从遥感影像(主要是 ASTER 和 SPOT)上提取出 DEM。Fu-jisada 等^[27]详细地介绍了运用 ASTER 遥感影像生成 DEM 的运算方法和操作步骤。Berthier 等^[28]根据 1994 年、2000 年和 2003 年的 3 期阿尔卑斯山 Mer de Glace 冰川所在区域的 SPOT 影像生成 DEM 与 1979 年地形图生成的 DEM,分析了 Mer de Glace 冰川近 25 a 来厚度的变化,结果显示海拔较高地区的冰川厚度几乎没有变化,而低海拔地区冰川厚度减薄且有后期加速的趋势,在海拔 $1\ 600\sim2\ 100\text{ m}$ 范围内,冰川厚度减薄速率从 $1\pm0.4\text{ m/a}$ (1979~1994 年)变为 $2.9\pm1.1\text{ m/a}$ (1994~2000 年),再到 $4.1\pm1.7\text{ m/a}$ (2000~2004 年)。近年来,随着航天飞机雷达地形测绘计划(SRTM)和先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(ASTER Global DEM)的发布,全球冰川厚度的遥感监测被越来越多的研究者关注。

SRTM 是 2000 年 2 月,由美国太空总署

(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合发射的“奋进”号航天飞机测量得到。获取的数据范围为 $60^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{S}$, $180^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{W}$ 区域,覆盖全球陆地表面的80%以上。2009年6月30日,NASA与日本经济产业省(METI)共同推出了最新的地球电子地形数据 ASTER Global DEM,该数据是根据 NASA 的新一代对地观测卫星 Terra 的详尽观测结果制作完成的。这一全新地球数字高程模型包含了 ASTER 传感器搜集的 130 万个立体图像。

Schneider 等^[29]在研究墨西哥 Iztaccihuatl 山的冰川灾害时,根据 1959 年地形图得出 Iztaccihuatl 山冰川的最高海拔为 5 270 m,运用 2000 年 SRTM 数据和 2004 年 GPS 野外实测资料,再考虑到误差影响,最后得出 Iztaccihuatl 山冰川 2000~2004 年最高海拔为 $5\,200\pm 15\text{ m}$,表明该冰川区最高海拔 45 a 来减少了 70 m。

3.2 运用雷达数据测量冰川厚度

运用遥感光学影像生成 DEM,计算不同时间段冰川厚度变化,能直接计算出冰川的体积变化量,但是这种方式却不能得知冰川的确切厚度和冰川体积,而且冰下地形是研究冰川地貌形成过程与机制的对象,同时也是冰川动力学研究中需要考虑的内容。而冰储量又是表征冰川水资源变化状况的最直接参数,所以有效地探测冰储量对冰川水资源评估与研究都具有十分重要的意义^[30]。

前人主要是依据经验公式来估计高山区冰川的厚度和体积,如瑞士阿尔卑斯山冰川目录中计算冰川平均厚度就采用了经验公式(2)^[31]:

$$\bar{H} = 5.2 + 15.4\sqrt{F} \quad (2)$$

其中: \bar{H} 为冰川平均厚度, F 为冰川面积,5.2和15.4为选用的系数,从公式(2)得出冰川的平均厚度和冰川面积之间的关系为抛物线。王宗太等^[32]根据祁连山区实际情况,参考阿尔卑斯山冰川平均厚度公式,得出祁连山区冰川平均厚度的计算公式(3):

$$\bar{H} = 34.4F^{0.45} \quad (3)$$

其中: \bar{H} 为冰川平均厚度, F 为冰川面积,34.4和0.45为选用的系数,但这个公式仅适用于面积为 $0.05\sim 10\text{ km}^2$ 的冰川。依据经验公式计算冰川平均厚度在一定程度上可以提供相对可靠的冰川厚度和体积资料,但是这种方法也存在一定缺陷。首先,计算冰川平均厚度的必要条件是知道冰川的面积,所以冰川面积的准确与否直接关系到冰川厚度和冰川体积的可靠性;其次,经验公式本身是统计公式,只适用于某一区域的大部分冰川,不适用于某一个

特定的冰川。而雷达技术却能弥补这一不足。雷达的工作原理是发射机通过天线把电磁波能量射向空间某一方面,处在此方向上的地物反射碰到的电磁波;雷达天线接收此反射波,经过处理运算提取有关该地物所需要的信息。合成孔径雷达(SAR)就是利用雷达与目标的相对运动把尺寸较小的真实天线孔径用数据处理的方法合成一较大的等效天线孔径的雷达,比普通雷达分辨率更高,且有全天时、全天候、不受大气传播和气候的影响等特点。

合成孔径雷达数据在 20 世纪 80 年代就开始用来提取雪盖信息^[33]。而随着电磁波理论、电子技术及雷达技术的发展,合成孔径雷达技术也逐渐被学者运用在现代冰川变化研究中。Shi 等^[34]运用合成孔径雷达对阿尔卑斯山区冰川进行研究时发现,雷达数据比 Landsat TM 影像更容易区分出冰川区和非冰川区。孙波等^[35]利用雷达对天山 1 号冰川的厚度进行了测量,发现天山 1 号冰川东西坡的平均厚度分别为 58.77 m 和 44.84 m,冰储量分别为 0.051 km^3 和 0.020 km^3 ,对数据分析后认为冰川合成孔径雷达测厚的误差小于 1.2%。Andres 等^[36]运用 SAR 对南极洲西部埃尔斯沃思山联合冰川厚度进行测量,结果显示此处冰川厚度最大值为 2 120 m,解决了 Casassa 等^[37]因为冰川太厚,电磁波无法达到冰川底部的问题。

4 冰川运动速度研究

随着冰川学的不断发展,现代冰川的研究已经不仅仅局限在冰川面积和体积的变化上,越来越多的研究者把目光投到冰川运动方面。一般来说,海洋性冰川比大陆性冰川运动速度快,地理位置相同的冰川,大冰川比小冰川运动速度快,在冰川横断面上,冰川中心比冰川边缘运动速度快^[38]。

传统的方法研究冰川运动速度主要是在冰川上布设测杆,并进行长期连续观测。井哲帆等^[39]通过在天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川上布设 18 根测杆,对其表面运动和物质平衡进行了研究,发现 1999~2001 年冰川表面运动值不大,最大流速点的速度为 3.15 m/a。而乌鲁木齐河源 1 号冰川的运动速度则较大,1960 年、1961 年和 1962 年最大运动速度分别为 21.3 m/a、29.23 m/a 和 31.48 m/a,1962 年之后,冰川的运动速度不断衰减,到 2000 年左右,冰川的平均运动速度也在 5 m/a 左右^[40],并且这个趋势还会持续下去,在今后的一段时间里,1 号冰川的平均运动速度不会超过 5 m/a^[41]。2008

~2009 年祁连山老虎沟 12 号冰川最大流速 32 m/a 左右,高出年平均运动速度 38%,相比于 1959 年观测结果,老虎沟 12 号冰川年运动速度减缓 11%^[42]。

目前,冰川运动速度的研究中出现了一些新的方法,主要有高精度差分 GPS、合成孔径雷达干涉以及光学影像互相关等。

差分 GPS 方法是基于传统的在冰川表面布设测杆,长期观测其空间位置的相对变化信息。这种方法精度好、可靠性强,但由于条件限制,难以大范围使用。

雷达差分干涉测量(Differential SAR Interferometry, DINSAR)技术探测视线向位移的精度可达毫米级,具有较高的精度^[43]。从 1993 年 Goldstein 等^[44]第一次运用 ERS-1 DINSAR 数据研究南极 Rutford 冰河的流速后,DINSAR 技术被运用于许多冰川的流速研究。程晓等^[45]利用 ERS-1/2 SAR 和 JERS-1 雷达影像对南极格罗夫山地区的冰川运动规律进行研究,得出此处冰川运动速度为 7.45 m/a,并指出 DINSAR 技术是精确测量南极内陆冰盖地区复杂冰流的有效手段,而且 L 波段较 C 波段更适于该类地区复杂快变冰流的测量。Lan 等^[46]运用合成孔径雷达数据计算并绘制出了格陵兰冰盖的大部分冰川 2000~2001 年和 2005~2006 年冬天的运动速度图,从而获得了格陵兰冰盖几百条冰川的详细运动速度和方向。该方法能快速、精确地提取内陆冰盖地区的大范围复杂冰流信息,这是常规地面测量无法比拟的,但其需要时间间隔较短的连续影像,且在山地冰川区受到一定的限制^[47]。

光学影像互相关方法是依据不同时相的两幅经过精确纠正处理的影像,同名点间存在的位置差别,可以认为是冰川的自身运动所引起的。所以 SPOT、ASTER、Landsat 等只要影像的分辨率优于观测时段内冰川表面总的位移量就可以用来获取冰川表面运动速度。Kääb^[48]运用 ASTER 影像获取不丹喜马拉雅主峰北坡冰舌部分表面最大流速为 100~200 m/a,而南坡冰川的冰舌部分每年流速只有几十米。Berthier^[47]通过 SPOT5 影像对阿尔卑斯山 Blanc 峰地区的冰川表面流速进行了计算,发现 Mer de Glace、Bosson 和 Brenva 冰川冰瀑布区表面流速最大,可达 500 m/a。该方法具有覆盖范围大且数据源比较广泛的优点,但要求研究区必须有两幅或两幅以上可以识别冰川表面纹理的遥感影像,且影像需要经过地形纠正。

5 结 语

随着现代计算机技术的进步和遥感数据在现代冰川变化研究中的应用,更便捷、更精确的方法不断出现。现代冰川面积、体积变化和冰川运动速度的监测,分为传统的实测方法和运用遥感卫星技术获取的方法。

目前,在现代冰川面积变化的研究中,传统的方法主要是依靠观测站的实地观测,该方法精度高,数据时间连续,虽存在即使投入大量的人力也不能进行大面积观测的缺点,但仍是现代冰川研究中不可或缺的手段。运用遥感技术判读主要分为目视解译和计算机自动分类方法。目视解译方法精度高,方法相对简单,缺点是耗时较长,有时会因个人主观因素而误判冰川区。计算机自动分类方法有多种,各有优势,阈值法操作简单,但是区分效果不太明显,较少应用在实际研究中;雪盖指数阈值法比直接用阈值法要精确且可靠,但是在选取阈值方面很难把握;非监督分类方法全程几乎不要人为干涉,但是精度很低,适用于无云、无表碛覆盖、雪盖较少的冰川,因此极大限制了其在实践中的应用;监督分类方法如果训练区选择准确,准确度明显高于非监督分类,但是部分积雪和岩石还是容易被错分;波段比值阈值法以其操作相对简单,精度准确等特点是目前运用最多的计算机自动分类方法。

即使运用同一种方法,在不同的研究区和选用不同的遥感影像所得到的效果也可能不一样,所以如果研究者发现当一种计算机自动解译方法不能很好地提取出研究区的冰川区和非冰川区时,可以选用另一种计算机分类方法,也许分类的精确度会更高。而且这几种方法也可以结合起来,互相补充,以更准确地提取冰川信息。例如 Frank^[25]在运用波段比值的法提取冰川边界时,发现阴影区冰川边界不能被很好地区分,又结合了波段阈值法选用 TM1 > 59,结果发现即使在最难区分的冰川区(有云影响或处于阴影区的冰川),冰川边界也提取的非常好,只有一些表碛区冰川和一些错分的冰湖区需要人工修改,比单一地用波段阈值法或者只用波段比值阈值法实用和精确。

在现代冰川体积变化研究中,传统方法主要运用花杆监测数据来计算冰川厚度变化以及依据冰川面积运用经验公式推算冰川的体积。运用花杆监测能直观地反映出冰川厚度变化,而且比较经济,但是需要大量的人力,也不能进行大面积观测。而运用

面积和体积的关系公式来估算冰川的体积,也存在不够精确等缺点。随着数字高程模型和雷达技术的发展和运用,现代冰川体积变化方法出现了通过提取遥感影像的高程信息获得冰川区数字高程模型和运用雷达技术直接测量冰川厚度的方法。提取不同时相遥感影像的高程信息广泛应用在计算冰川厚度变化的研究中,这种方法有效地解决了传统方法不能进行大面积监测的问题,但缺陷是不能准确获知冰川的体积;运用雷达技术测量冰川厚度,可以准确得出冰川的实际体积。

近年来,现代冰川变化研究中运用最多的遥感影像数据是 Landsat 和 ASTER 影像,首先是由于 Landsat 和 ASTER 影像分辨率相对较精确,分别为 30 m 和 15 m,在一般的现代冰川变化研究中,这样的精度还是能够满足需求;其次是因为 Landsat 和 ASTER 影像覆盖范围广、价格较低,有许多网站和大学也公开发布 Landsat 和 ASTER 影像以供免费下载,对于研究者可以减少很多的成本。而对于分辨率更高的 SPOT 和 ALOS 等遥感数据的应用比较少,主要是因为它们的分布范围较小,对于高山冰川区很少有覆盖,而且价格昂贵,所以一般只作为对 Landsat 和 ASTER 影像的补充和验证。

用计算机方法提取冰川信息时,所采用的遥感数据应尽量选择无云雪影响,以保证精度的可靠性。但是在高山冰川区,无云雪影响的遥感影像比较少,限制了计算机自动分类方法的可行性。几乎所有的研究者对提取后的冰川区的表碛区、阴影区都要进行目视解译纠正,因为计算机自动分类方法还不能完全解决同物异谱和异物同谱现象,即不能区分出表碛区和阴影区的冰川区与非冰川区。最后还得依靠最为准确的野外实地测量进行验证工作,虽然如此,计算机自动分类方法还是极大地提高了现代冰川研究的工作效率。而雷达数据具有不受大气传播和气候的影响等特点,能很好地弥补遥感光学影像数据的不足,但是雷达数据的获取渠道不太方便,而且处理技术还不为多数人所了解,所以雷达数据的应用也并不是十分广泛,相信随着雷达数据和高精度的 GPS 数据的不断应用,必将会给现代冰川变化研究带来一次新的变革。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers. Report of Working Group II of The Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Oerlemans J. Quantifying Global Warming from the Retreat of Glaciers[J]. Science, 1994, 264(5156): 243-245.
- [3] Xie Zichu, Wu Guanghe, Wang Lilun. The Changes of Glaciers in Qilian Mountains[J]. Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology Chinese Academy of Sciences No. 5: Glacier Variations and Utilizations in Qilian Mountains, 1985: 27-40. [谢自楚, 伍光和, 王立伦. 祁连山冰川近期的进退变化[J]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第 5 号: 祁连山冰川变化及其应用, 1985: 27-40.]
- [4] Liu Chaohai, Xie Zichu, Yang Huian, *et al.* Observation, Interpolation and Trend Study of Glacial Mass Balance on the Qiye Glacier in Qilian Mountain[J]. Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology Chinese Academy of Sciences No. 7: The Monitoring of Glacier, Climate, Runoff Changes and the Research of Cold Region Hydrology in Qilian Mountain, 1992: 21-33. [刘潮海, 谢自楚, 杨慧安, 等. 祁连山“七一”冰川物质平衡的观测、插补及趋势研究[J]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第 7 号: 祁连山冰川、气候及径流变化监测与寒区水文研究专辑, 1992: 21-33.]
- [5] Dwyer J L. Mapping Tide-water Glacier Dynamics in East Greenland Using Landsat Data[J]. Journal of Glaciology, 1995, 41(139): 584-595.
- [6] Braun M, Rauf, Simões J C. A GIS Glacier Inventory for the Antarctic Peninsula and the South Shetland Islands—A First Case Study on King George Island[R]. International GIS Workshop on Antarctic King George Island, 2000: 1-12.
- [7] Casassa A G, Katrine S, Andres R, *et al.* Inventory of Glaciers in Isla Riesco, Patagonia, Chile, based on Aerial Photography and Satellite Imagery[J]. Annuals of Glaciology, 2002, 34: 373-378.
- [8] 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.
- [9] Kaab A. Monitoring High-mountain Terrain Deformation from Repeated Air- and Spaceborne Optical Data: Examples Using Digital Aerial Imagery and ASTER Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2002, 157(1-2): 39-52.
- [10] Cao Bo, Pan Baotian, Gao Hongshan, *et al.* Glacier Variation in the Lenglongling Range of Eastern Qilian Mountains from 1972 to 2007[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 242-248. [曹泊, 潘保田, 高红山, 等. 祁连山东段冷龙岭近 35 年现代冰川变化[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 242-248.]
- [11] Jacobs J D, Simms E L, Simms A. Recession of the Southern Part of Barnes Ice Cap, Baffin Island, Canada, between 1961 and 1993, Determined from Digital Mapping of Landsat TM[J]. Journal of Glaciology, 1997, 43: 98-102.
- [12] Jin Rui, Che Tao, Li Xin, *et al.* Glacier Variation in the Punqu Basin Derived from Remote Sensing Data and GIS Technique

[1] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers. Report of Working Group II of The Intergovernmental Panel on Climate Change

- [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 261-266. [晋锐, 车涛, 李新, 等. 基于遥感和 GIS 的西藏朋曲流域冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 261-266.]
- [13] 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, 刘世银. 利用 TM 高光谱图像提取青藏高原喀喇崑崙山区[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(5): 435-440.]
- [14] Hall D K, Bayr K J, Bindschadler R, *et al.* Changes in the Pastertze Glacier, Austria, as Measured from the Ground and Space[J]. The 58th Eastern Snow Conference, 2001: 197-193.
- [15] Aniya M, Sato H, Naruse R, *et al.* The Use of Satellite and Airborne Imagery to Inventory Outlet Glaciers of the Southern Patagonian Icefield, South America[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1996, 62(12): 1361-1369.
- [16] Sidjak R W, Wheate R D. 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.
- [17] 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): 263-268. [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[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 263-268.]
- [18] Bayr K J, Hall D K, Kovalick W M. Observations on Glaciers in the Eastern Austrian Alps Using Satellite Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(9): 1733-1742.
- [19] Rott H. Thematic Studies in Alpine Areas by Means of Polarimetric SAR and Optical Imagery[J]. Advances in Space Research, 1994, 14: 217-226.
- [20] Paul F, Kääb A, Maisch M, *et al.* The New Remote-sensing-derived Swiss Glacier Inventory; I. Methods[J]. Annals of Glaciology, 2002, 34: 355-361.
- [21] Narama C, Shimamura Y, Nakayama D, *et al.* Recent Changes of Glacier Coverage in the Western Terskey-Alatau Range, Kyrgyz Republic, Using Corona and Landsat[J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 223-229.
- [22] Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, *et al.* Monitoring the Glacier Changes in the Muztag Ata and Konggur Mountains, East Pamirs, based on Chinese Glacier Inventory and Recent Satellite Imagery[J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 79-85.
- [23] Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, *et al.* Glacier Changes in the West Kunlun Shan from 1970 to 2001 Derived from Landsat TM/ETM+ and Chinese Glacier Inventory Data[J]. Annals of Glaciology, 2007, 46: 204-208.
- [24] Bolch T. Climate Change and Glacier Retreat in Northern Tian Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) Using Remote Sensing Data[J]. Global and Planetary Change, 2007, 56: 1-12.
- [25] Paul F, Anderassen L M. A New Glacier Inventory for the Svalbard Region, Norway, from Landsat ETM+ Data: Challenges and Change Assessment[J]. Journal of Glaciology, 2009, 55(192): 607-618.
- [26] Jeffrey S K, Michael J A, Michael P B, *et al.* Multispectral Imaging Contributions to Global Land Ice Measurements from Space[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99: 187-219.
- [27] Fujisada H, Bailey G B, Kelly G G, *et al.* ASTER DEM Performance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(12): 2707-2714.
- [28] Berthier E, Arnaud Y, Baratoux D, *et al.* Recent Rapid Thinning of the "Mer De Glace" Glacier Derived from Satellite Optical Images[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31.
- [29] Schneider D, Granados H D, Huggel C, *et al.* Assessing Lahars from Ice-Capped Volcanoes Using ASTER Satellite Data, the SRTM DT Mand Two Different Flow Models: Case Study on Iztaccihuatl (Central Mexico)[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8: 559-571.
- [30] 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.]
- [31] Müller, F, Caflisch T, Müller G. Firn Und Eis Der Schweizer Alpen: Geographisches[J]. Zürich, Eidgenössische Schweizer Hochschule. Geographisches Institut Publ, 1976, 57.
- [32] Wang Zongtai. Glacier Inventory of China: Qilian Mountain [M]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 1981. [王宗太. 中国冰川目录 I —— 祁连山区[M]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981.]
- [33] Matzler C, Schanda E. Snow Mapping with Active Microwave Sensors[J]. International Journal of Remote Sensing, 1984, 5(2): 211-218.
- [34] Shi J C, Jeff D, Helmut R. Snow Mapping in Alpine Regions with Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(1): 152-158.
- [35] Sun Bo, He Maobing, Zhang Peng, *et al.* Topography and Ice Volume at Glacier No. 1 in the Tian Shan, China, by Ground Penetrating Radar[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2003, 15(1): 35-44. [孙波, 何茂兵, 张鹏, 等. 天山 1 号冰川厚度和冰下地形探测与冰储量分析[J]. 极地研究, 2003, 15(1): 35-44.]
- [36] Andres R, Zamora R, Camilo R, *et al.* Glaciological Investigations on Union Glacier, Ellsworth Mountains, West Antarctica[J]. Annals of Glaciology, 2010, 51(55): 91-96.
- [37] Casassa, G, Rivera A, Acuña C, *et al.* Elevation Change and Ice Flow at Horseshoe Valley, Patriothills, West Antarctica[J]. Annals of Glaciology, 2004, 39: 20-28.
- [38] Shi Yafeng. An Introduction to the Glaciers in China[M]. Beijing: Science Press, 1987: 88-104. [施雅风. 中国冰川概论[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 88-104.]
- [39] Jing Zhefan, Ye Baisheng, Jiao Keqin, *et al.* Surface Velocity on the Glacier No. 51 at Haxilegen of the Kuytun River, Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 563-566. [井哲帆, 叶柏生, 焦克勤, 等. 天山奎屯

河哈希勒根 51 号冰川表面运动特征分析[J]. 冰川冻土, 2002,24(5):563-566.]

[40] Li Zhongqin,Han Tianding,Jing Zhefan,*et al.* A Summary of 40-Year Observed Variation Facts of Climate and Glacier No.1 at Headwater of Ürümqi River, Tianshan, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2003,25(2):117-123. [李忠勤,韩添丁,井哲帆,等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40a 观测事实[J]. 冰川冻土,2003,25(2):117-123.]

[41] Jiao Keqin,Jing Zhefan,Han Tianding,*et al.* Variation of Glacier No. 1 at the Headwaters of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains During the Past 42 Years and Its Tread Prediction[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2004, 26(3):253-260. [焦克勤,井哲帆,韩添丁,等. 42a 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.]

[42] Liu Yushuo, Qin Xiang, Du Wentao, *et al.* Analysis of the Movement Features of Laohugou Glacier No. 12 in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2010, 32(3):475-479. [刘宇硕,秦翔,杜文涛,等. 祁连山老虎沟 12 号冰川运动特征分析[J]. 冰川冻土,2010,32(3):475-479.]

[43] Luckman A, Quincey D, Bevan S. The Potential of Satellite Radar Interferometry and Feature Tracking for Monitoring Flow Rates of Himalayan Glaciers[J]. Remote Sensing of Environment,2007,111(2-3):172-181.

[44] 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,1993,262:1525-1530.

[45] Cheng Xiao, Li Xiaowen, Shao Yun, *et al.* Dinsar Measurement of Glacier Motion in Antarctic Grove Mountain[J]. Chinese Science Bulletin,2007,52(3):358-366. [程晓,李小文,邵芸,等. 南极格罗夫山地区冰川运动规律 Dinsar 遥感研究[J]. 科学通报,2006,51(17):2060-2067].

[46] Joughin L, Smith B R, Howat L M, *et al.* Greenland Flow Variability from Ice-Sheet-Wide Velocity Mapping[J]. Journal of Glaciology,2010,56(197):415-430.

[47] Berthier E, Vadon H, Baratoux D, *et al.* Surface Motion of Mountain Glaciers Derived from Satellite Optical Imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2005,95(1):14-28.

[48] Kääb A. Combination of SRTM3 and Repeat Aster Data for Deriving Alpine Glacier Flow Velocities in the Bhutan Himalaya[J]. Remote Sensing of Environment,2005,94:463-474.

[49] Haeberli W, Cihlar J, Barry R G. Glacier Monitoring within the Global Climate Observing System[J]. Annals of Glaciology,2000,241-246.

The Remote Sensing in Research of Modern Glacier Changes

CAO Bo, WANG Jie, ZHANG Chen, ZHANG Guo-liang, PAN Bao-tian

(Key Laboratory of Western China's Environmental System and Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Traditional research methods in modern glacier changes mainly based on field observations and empirical formula to calculate changes in glacier area, volume and surface velocity, however, since 1980s, with the new technologies of aerial remote sensing images, digital elevation model, radar, etc. developed, the studies of nature and characteristic of glaciers and detection of dynamic changes in glacier have not only become the important trends of glacier research by means of remote sensing method, but also greatly resolved the problems such as limited information in high mountain areas. The computer-based automatic interpretation methods in the study of glacier area change including threshold and NDSI (Normalized Difference Snow Index), supervised classification and non-supervised classification, threshold value of band ratio, etc. Although the operating of threshold and NDSI are simple, they are difficult to select the suitable threshold on such issues; Non-supervised classification method is simple but more constraints. With the accurate selection of training area, the result of supervised classification method is more accurate. The threshold value of band ratio method is the most widely used computer automatic classification because of its simple operation and accurate result. The application of Digital Elevation Model and radar data in the study of glacier volume change preferably improves the accuracy and applicability of traditional methods. And that radar data will not be affected by atmospheric propagation and climate change compensated for the weak script of remote sensing images data which is easily influenced by snow and clouds. With the development and application of high precipitation GPS and radar data, it plays an irreplaceable role in surface velocity studies.

Key words: Modern glacier; Remote sensing; Computer automatic interpretation; Radar