

引用格式: 叶庆华,程维明,赵永利,等.青藏高原冰川变化遥感监测研究综述[J].地球信息科学学报,2016,18(7):920-930. [Ye Q H, Cheng W M, Zhao Y L, *et al.* 2016. A review on the research of glacier changes on the Tibetan Plateau by remote sensing technologies. Journal of Geo-information Science, 18(7):920-930] DOI:10.3724/SP.J.1047.2016.00920

青藏高原冰川变化遥感监测研究综述

叶庆华^{1*},程维明²,赵永利³,宗继彪¹,赵 瑞¹

1. 中国科学院青藏高原研究所,北京 100101;2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101;3. 中国科学院大学,北京 100049

A Review on the Research of Glacier Changes on the Tibetan Plateau by Remote Sensing Technologies

YE Qinghua^{1*}, CHENG Weiming², ZHAO Yongli³, ZONG Jibiao¹ and ZHAO Rui¹

1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100101, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: It is well known that glaciers in mountains are retreating widely in a warmer climate during recent decades on the Tibetan Plateau (TP). The runoffs from both glaciers and glacier lakes have been increased significantly, and the potential outbursts of glacier lakes have threaten the residence safety in China and the adjacent countries. However, most of the glaciers locate in very distant mountains. As glaciers are difficult to be investigated due to the huge investments and long travelling time of field survey, remote sensing monitoring has been the major approach adopted to understand the changes of glaciers nowadays. This paper has summarized several important items about current glacier studies, which includes: the development of remote sensing techniques on mountain glacier monitoring; the previous concluded results on glacier surface elevation changes in the major mountains on TP; and the problems and research trends of glacier studies based on the remote sensing techniques. Moreover, this paper reveals the glacier surface elevation changes on TP based on the ICESat/GLAS data. It shows that during 2003-2009 the glacier surface elevation on TP has changed by -0.24 ± 0.03 m/a in average and yielding a mass change by -14.86 ± 11.88 km³/a, whose melting water would run into rivers or lakes. The glacier change pattern on TP shows an obviously spatial-temporal heterogeneity, which decreases from the south and east TP toward the inland TP, and then it keeps decreasing toward the north and west TP.

Key words: glacier; remote sensing; review; Tibetan Plateau; Integrated research by multi-disciplines

***Corresponding author:** YE Qinghua, E-mail: yeqh@itpcas.ac.cn

摘要:在全球变暖影响下,青藏高原冰川消融造成的冰川径流增大、冰湖溃决等问题威胁着山区及其周边居民的生命财产安全,对青藏高原冰川变化的研究日益紧迫。本文综述了国内外山地冰川变化遥感监测手段的发展、冰川面积及冰面高程变化的遥感监测研究现状、存在问题与发展趋势,并总结了青藏高原冰川变化遥感监测研究的主要成果。此外,本文基于2003-2009年ICESat/GLAS数据,计算了青藏高原各山区冰面高程变化及其冰川消融量。结果显示:青藏高原冰川面积持续减少,青藏高原冰面高程的平均变化为 -0.24 ± 0.03 m/a,冰川融水量为 -14.86 ± 11.88 km³/a,冰川变化呈现从青藏高原东、南外缘山区往内陆与西、北部山区减慢的时空特征。

关键词:冰川;遥感;综述;青藏高原;多学科综合与集成

收稿日期:2016-01-16;修回日期:2016-03-02.

基金项目:国家自然科学基金项目“青藏高原西部地区冰川冰储量变化及水文效应”(41530748)、“全球环境变化遥感对比研究”(41120114001);科技基础性工作专项项目“中国西部主要冰川作用中心冰量变化调查”(2013FY111400-2)。

作者简介:叶庆华(1972-),女,博士,副研究员,研究方向为冰冻圈遥感与GIS应用。E-mail: yeqh@itpcas.ac.cn

1 引言

山地冰川,尤其是那些处于温带的冰川,被认为是气候变化的最佳天然指示器之一^[1]。近年来,冰川对湖泊与海平面上升的贡献也日益受到关注,全球冰川消融对海平面上升贡献率为 $29\pm 13\%$,全球冰川和冰盖的消融对海平面上升贡献率占 $61\pm 19\%$ ^[2]。青藏高原及其相邻山区发育了面积约5万 km^2 的冰川,拥有极地外中低纬度区面积最大的冰川,是亚洲许多著名江河的发源地,也是内陆干旱区宝贵的水资源^[3]。冰川活动是诱发冰川泥石流、冰崩/雪崩、冰湖溃决等灾害的重要因素,通常冰川洪水是具有最大和最广泛影响的冰川灾害之一^[4]。例如,冰川消融造成冰碛湖的形成和扩展,由冰碛或冰坝湖引发的冰川洪水灾害频繁发生,在青藏高原及喜马拉雅山脉地区,山地冰川活动及冰湖溃决给中国及周边国家(如印度和尼泊尔山区)的人们生命财产安全带来灾难性威胁^[5]。因此,随着全球变化研究的深入,对冰川变化(包括面积、厚度、冰储量等)的研究越来越重要^[6],它在全球水资源和气候变化、灾害预警等方面都具有重大意义^[7]。

2 冰川变化遥感监测手段的发展

在1930s以前,冰川末端的变化研究一直依靠实地对冰川末端若干固定点进行定期测量、制图以及计算冰川长度的变化,测量精度一般在几米以内^[8]。由于冰川实测耗资巨大且异常艰辛,截止到1984年,全球只有25条冰川进行了50年左右的实地连续观测^[9]。1940s以后,人们可借于航空摄影技术与过去实地测量的控制点处理航片,并测绘冰川末端位置^[10]。

在过去的几十年里,遥感技术克服了以往野外考察范围和实测数据的局限性,大大缩短了考察周期、节省了考察经费,提高了考察效率。数字遥感图像可以在没有地面观测数据情况下,通过2期以上数字遥感图像的配准较准确地量算冰川末端与面积变化。世界上最早利用民用卫星监测冰盖始于1964年^[11],用Nimbus卫星影像来观测南极冰山。到1970s,随着1972年陆地资源卫星MSS(Multispectral Scanner)的发射,使人们能更广泛地从太空观测冰川^[12],此后陆地资源卫星系列(包括TM(Thematic Mapper), ETM+(Enhanced Thematic

Mapper Plus),以及2013年2月发射的Landsat8 OLI(Operational Land Imager),已成为国内外观测冰川变化的主要光学遥感数据源之一^[13]。2000年以来,随着遥感技术的发展,冰川遥感数据日益丰富(表1)。由于光学传感器所获得的数据受冰面上云、雨、雾的影响限制了它的应用,而微波遥感可全天候、全天时地获取地面数据,特别是星基微波雷达观测,能够发挥光学遥感所不能比及的作用^[14]。

可见,自1960s以来,卫星遥感技术革新了冰川研究领域,成为目前全球尺度冰川持续观测的主要技术手段^[15]。在过去50年,卫星遥感技术在冰冻圈观测中取得了很大进展^[16]。虽然很多分类方法可以比较准确地从多光谱影像中自动提取净冰川(Clean glacier),如最大似然分类法、波段比值法(TM4/TM5(ASTER 3/ASTER 4)、TM3/TM5比值)等,但由于相当多的山谷冰川被不同类型的表碛所覆盖,以及冰川边缘积雪、山体阴影等问题,使冰川边界难以被准确地自动识别。而且,由于缺乏地面冰川实测数据检验^[17],以及多源数据分类结果之间存在的“变化噪声”等问题^[18],在冰川及其变化的自动测图方面至今还存在诸多挑战^[19]。虽然基于多光谱卫星遥感影像,可以简便快捷地得到冰川二维信息(如冰川条数、范围、面积、形态)及许多冰川特征界限(如雪线、冰舌末端)等参数,却无法获知与高程有关的三维参数^[20]。冰面高程变化测量是目前冰川遥感监测中的主要缺口^[21]。

3 冰川储量变化的遥感监测研究

冰面高程数据是冰储量变化研究的基础数据,目前主要来源于实地观测、历史地形图、遥感监测3种方式。实地立体摄影测量^[10,22]、差分GPS/DGPS(Differential Global Positioning System)^[23]或探地雷达测量^[24],可直接获取观测点冰面高程数据,一般用于小范围大比例尺(如比例尺大于1:2000)观测。实地测量获取数据的方法精度高,可靠性强,但野外工作量及其耗资巨大,仅限于局部或小范围监测。1940s以来的航空摄影测量^[25],是测绘历史地形图和早期数字高程模型DEM(Digital Elevation Model)的主要数据源,是目前冰面高程变化研究的前期主要基准数据之一。冰面高程变化研究常用卫星/航空测高数据如表2所示。

1960s以来星基光学立体像对、2000年以来的

表 1 冰川面积遥感监测常用星载遥感数据列表

Tab.1 List of satellites/sensors used for glacier area monitoring

卫星/传感器	重访周期/d	空间分辨率/m	发射时间
Landsat 1-5/Multispectral Scanner (MSS)	18	80	1972-07/1975-01/1978-03/ 1982-07/1984-03
Landsat 4-5/Thermal Infrared Sensor (TM)	16	30	1982-07/1984-03
Landsat 7/Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	16	30(全色 15)	1999-04
Landsat 8/Operational Land Imager (OLI)	16	30(全色 15)	2013-02
SPOT 1-4/High Resolution Visible (HRV)	26	20	1986-02/1990-01/1993-09
SPOT 5/High Resolution Geometrical (HRG)	5	10	2002-05
SPOT 6-7/New AstroSat Optical Modular Instrument (NAOMI)	26	6(全色 1.5)	2012-09/2014-06
CBERS01,02,02B/ChargeCoupled Device (CCD)	26	19.5	1999-10
QuickBird	1-6	2.44	2001-10
IKONOS/Visible Sensors	3	4(全色 1)	1999-09
Terra/Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)	16	15	1999-12
IRS P5/Cartosat 1	5	2.2	2005-05
IRS P6/Resourcesat-1	5	5.8	2003-10
Formosat-2	4-5	8	2004-05
ALOS/Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2)	2	10	2006-01
HJ-1A/B/CCD	4	30	2008-09
GF-1/CCD	4(侧摆)	8(全色 2)	2013-04
GF-2/CCD	5(侧摆)	4(全色 1)	2014-08

表 2 冰面高程变化研究常用卫星/航空测高数据

Tab.2 List of satellites/sensors used for glacier surface elevation change studies

卫星/传感器	发射时间	测高技术	空间分辨率/m	国家
航空摄影测量	1940s 以来	光学立体像对	-	各国
Corona/KH-4 (Key Hole-4)	1959-06	光学立体像对	1.83	美国
Hexagon KH-9	1971-06	光学立体像对	6	美国
Terra/ASTER	1999-12-18	光学立体像对	15	日本
SRTM-C	2000-02-11	InSAR,C 波段	30	美国
SRTM-X	2000-02-11	InSAR,X 波段	25	德国
SPOT5/HRS	2002-05-03	光学立体像对	2.5	法国
ICESat/GLAS (Ice, cloud, and land elevation satellite)/Geoscience Laser Altimeter System)	2003-01-13	激光雷达测高	65	美国
ALOS/PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instruments for Stereo Mapping)	2006-01-24	光学立体像对	2.5	日本
TerraSAR-X/TanDEM-X	2007-06-15/ 2010-06-21	InSAR,X 波段	3	德国
CryoSat-2/SIRAL (SAR Interferometer Radar Altimeter)	2010-04-08	合成孔径雷达测高	250	欧空局
ZY-3 (资源三号)	2012-01-09	光学立体像对	2.1	中国

雷达测高数据等已被广泛应用到冰面高程变化观测中^[26],近两年高精度的雷达差分干涉测量也开始应用到冰量变化研究中。1960-1972年美国Corona携带的KH-4(Key Hole-4)相机获得的高分辨率立体像对(<8 m)也被用于冰川区DEM的合成,但复杂地形增大了数据处理难度和高程误差^[27]。2000

年2月,美国奋进号航天飞机携带C/X波段雷达进行了为期11 d覆盖全球80%地区的制图任务飞行SRTM(Shuttle Radar Topography Mission),且使用单轨双天线模式,运用干涉方法获取了覆盖全球80%地区的DEM,目前在冰面高程变化研究中应用广泛,但SRTM DEM在复杂山区出现的偏差也不

容忽视^[28]。此外, ASTER GDEM(Global Digital Elevation Model)也为冰面高程变化研究提供了DEM参考数据, 但 ASTER GDEM是由2001–2011年的数据拼接而成, 没有准确日期, 而其高程偏差比SRTM DEM大, 限制了它的有效应用^[29]。

ICESat卫星(The NASA Ice, Cloud, and land Elevation Satellite)搭载的激光测高系统GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)在2003–2009年获取了全球大部分地区地表高程数据^[30], 其测点精度可达米级甚至10 cm量级^[31], 被广泛应用于湖泊水位变化和冰面高程变化研究^[21,32], 并在研究陆地冰储量变化中发挥了重要作用, 但ICESat数据限于卫星轨迹观测点分布, 大量小冰川没有测点分布, 不适合小冰川研究^[33]。

相比之下, 光学立体像对方法具有覆盖范围大、分辨率较高、数据源广泛等优点, 但受制于云、雪影响。星基或空基光学立体像对, 包括早期的航空像片, 星基光学立体像对(如SPOT5/HRS(High Resolution Stereoscopic)^[34]、ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)^[35]、ALOS/PRISM(Panchromatic Remote-sensing Instruments for Stereo Mapping)^[36]等), 常用于生成DEM, 可结合高度计、历史地形图、实测GPS点等不同时期测量的地表高程数据, 估算冰面高程/冰储量变化^[37]。

雷达干涉测量(Synthetic Aperture Radar Interferometry)是1990 s以来应用于冰川变形、冰流速度、地形测量的微波遥感新技术^[38], 利用相位差来提取地面目标的三维信息, 是研究冰川、冰原的重要工具^[39], 如2000年以来欧洲空间局的ERS-1, ERS-2、日本的JERS-1与ALOS/PALSAR(Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)和加拿大的RADARSAT-1等^[40]。近年来, 星载双站雷达差分干涉技术, 通过两副天线同时观测(单轨双天线模式), 基于同一目标对应的2个回波信号之间的相位差并结合轨道数据来提取高精度、高分辨率的冰川冰面高程变化, 如德国DLR的TerraSAR-X与TanDEM-X卫星双站模式, 在获取地表形变研究方面表现出独到优势, 已开始应用于冰面高程变化研究^[41]。

2002年3月发射的重力卫星GRACE(The Gravity Recovery and Climate Experiment)由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)合作研制, 为陆地水储

量、冰储量变化提供了新的监测手段, 在极地与山地冰川研究中得到广泛应用^[42]。但GRACE卫星数据受空间分辨率限制, 仅适用于全球、大陆或大区域尺度的总质量变化研究, 在单独用于揭示山地冰川变化量时存在争议较大^[2]。

4 中国青藏高原冰川变化的遥感监测研究

中国对于全新世山地冰川变化的研究始于20世纪五、六十年代^[43], 区域冰川变化数据多采用大范围野外调查、重复航空摄影测量技术以及80年代以来的遥感技术等方法获得^[44]。60年代中期以后, 随着研究的深入和野外考察区域的不断扩大, 取得了很多研究成果^[45]。到目前为止, 实测的冰川物质平衡或冰面高程变化记录仍然较少^[46], 如扎当冰川^[47]、小冬克玛底^[6]、帕隆12号及94号冰川^[46]、七一冰川^[48]、抗物热冰川^[6]、纳木那尼冰川^[24]。野外考察的耗时耗力和高成本极大地限制了青藏高原地面冰川变化实测研究的广泛开展。

60年代, 通过利用摄影经纬仪安置在地面固定的测站上, 在冰川上摄取立体像对, 然后利用立体测量制图的仪器进行量测和勾绘等高线, 采用“地形图比较法”绘制冰川变化图, 并采用重复地面立体摄影测量方法测定冰川的变化^[10]。80年代初, 中国开始利用陆地卫星像片, 采用放大镜、直尺和方格模片, 统计了区域冰川面积, 比较冰川变化, 并分析误差^[49]。进入90年代以来, 中国的冰川变化研究有了较大的发展, 开始采用多光谱数字遥感影像, 如Landsat MSS、TM、ETM+^[50–52]、微波遥感^[53]等。

中国第1期冰川编目是基于2000多幅1:50 000或1:100 000航测地形图, 先后利用1950s–1970s的航片342 000张, 1980s–1990s Landsat MSS影像200多景, 并组织了9次野外考察、搜集了20多次野外考察资料, 历时20多年完成^[54]。目前, 中国已在第1期冰川编目基础上, 发布了第2期冰川编目^[55–56], 主要基于2004–2011年Landsat TM/ETM+影像^[56], 在云雪影响严重的西藏东南部地区采用了部分第1期冰川编目数据(占15%左右)。这些工作为系统了解中国冰川资源分布及其变化奠定了基础。

2000年前后, 青藏高原冰川变化研究主要集中在冰川面积、长度变化监测^[57]。研究者利用卫星遥感数据对冰川面积变化进行了大量研究, 如祁连山

西段^[50,58]、祁连山东段冷龙岭地区^[59]、天山地区^[60]、长江源各拉丹冬^[61]、普若岗日冰原^[62]、喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区^[52]、珠峰北坡^[63]、希夏邦马峰地区^[48]以及朋曲流域^[64]等地区。青藏高原冰川变化区域差异很大,各地域冰川面积变化已经有学者做了全面总结^[65],显示青藏高原冰川面积在迅速减少,东南边缘山区冰川消融最快,从东南边缘到高原内陆冰川退缩速率减小^[3]。

近几年,基于卫星遥感技术监测高亚洲地区(包括青藏高原、喜马拉雅山脉地区)冰面高程变化、冰川储量或冰川物质平衡变化开展了大量工作,有不少论文在NATURE^[66-67]、SCIENCE^[2,68]、PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences)^[69]等刊物上发表,受到国内外广泛关注。目前,很多研究工作聚焦在喜马拉雅山脉地区^[66,68,70],青藏高原边缘与内陆冰川消融变化及其时空差异也日益被重视^[71]。这些研究大部分基于2003–2009年ICESat/GLAS落在冰川区足迹点,基于2010年以来雷达差分干涉测量获取冰面高程变化的工作也已开展^[42],但只有少数地区冰川的遥感监测研究是长时段的、基于早期光学立体像对生成的DEM,如慕士塔格冰川^[72]、天山一号冰川^[38]、喜马拉雅山脉柯西河流域^[73]、珠峰北坡绒布流域1974–2006^[74]。自从2013年以来,随着中国科技部科技基础性工作专项项目“中国西部主要冰川作用中心冰量变化调查”启动,青藏高原冰川储量变化调研工作已经全面展开。

本文基于青藏高原2003–2009年ICESat/GLA06数据(Release 33),将ICESat数据的Topex/Poseidon椭球体和EGM2008大地水准面,转换为SRTM DEM所用的WGS84^[75],采用Gardner等的方法所得数据^[2],运用DEM投影方法^[76],将5 km范围内ICESat/GLA06不同年份邻近轨迹点所在位置的SRTM DEM高程值减掉,即去除因邻近轨迹所在椭球体位置差异而造成的表面高程差,并选择那些过境时间季节相同、不少于2年的邻近轨迹点,用于计算表面高程变化(dh)。本文采用第二次冰川编目中各山系冰川分布范围^[55],计算了各山系2003–2009年ICESat/GLAS不同年份邻近轨迹点之间年平均冰面高程变化(dh/dt)。根据目前人们广泛采用的冰密度 $850\pm 60\text{ kg m}^{-3}$ ^[77],计算冰川消融量(图1)。根据离冰川区1~5 km距离范围内非冰川区的轨迹点,计算高程变化误差,青藏高原范围内总体平均误差为 $\pm 0.26\text{ m}$,各山系有所不同(图1)。

研究结果显示,青藏高原2003–2009年冰面高

程平均变化为 $-0.24\pm 0.03\text{ m/a}$,冰川融水量总计为 $-14.86\pm 11.88\text{ km}^3/\text{a}$ 。这接近于姚檀栋等2004年的研究结果,过去40年中国冰川储量减少了估计 $452.77\sim 586.94\text{ km}^3$ (8.1%~10.5%)^[3],即平均为 $11.32\sim 14.67\text{ km}^3/\text{a}$ 。从图1可知,青藏高原边缘喜马拉雅山脉地区冰川消融最快,从青藏高原东南缘往高原内陆消融减慢,而羌塘高原、阿尔金山脉、昆仑山脉直到帕米尔高原东部,冰川变化几乎处于平衡状态、甚至是有所积累,与前人研究结果基本吻合。本文就目前为止刊发的青藏高原主要区域冰面高程变化的遥感监测研究成果进行了汇总与比较,如表3所示。

5 冰川变化遥感监测存在的问题与发展趋势

5.1 自动测图方法

在冰冻圈研究中,面对日益膨胀的遥感数据资源以及日益强烈的冰川消融,冰川变化的自动识别与测图方法研究也被提上日程。但冰川边缘积雪、山体阴影及各类表碛物覆盖等冰川识别问题,使冰川边界难以自动测图。目前,各种分类方法所得结果、人工修正工作量非常大,人工数字化方法依然被大量采用,因此在冰川及其变化的自动测图方面至今还存在诸多挑战。结合高精度DEM生成三维影像、基于地形特征进行冰川测图,有利于减少冰川识别的不确定性。发展适合不同尺度研究的冰川变化自动测图算法,是大规模山地冰川研究的方向之一。

在冰面高程变化的自动测图方面,人们已经认识到目前可用的各类测高或高程数据的局限性,即在地形复杂、陡峭山区精度都会大大降低^[86],难以准确量算冰面高程变化^[21],高精度山地冰面高程数据的获取、DEM的合成及其误差检测与剔除成为迫切需要解决的关键问题。通过将误差大于一定范围的测点剔除^[21],或基于误差分析进行DEM误差校正^[87],以及寻找早期高程数据、延长时间尺度等都可提高所用数据的总体精度。

5.2 跨学科、多平台综合集成研究

集成研究是全球环境变化研究未来的工作重点^[88],在方法上强调综合与集成^[7]。多圈层、多过程、多平台、多技术手段的跨学科综合研究是冰冻圈遥感发展的趋势。多平台观测冰川变化的优势

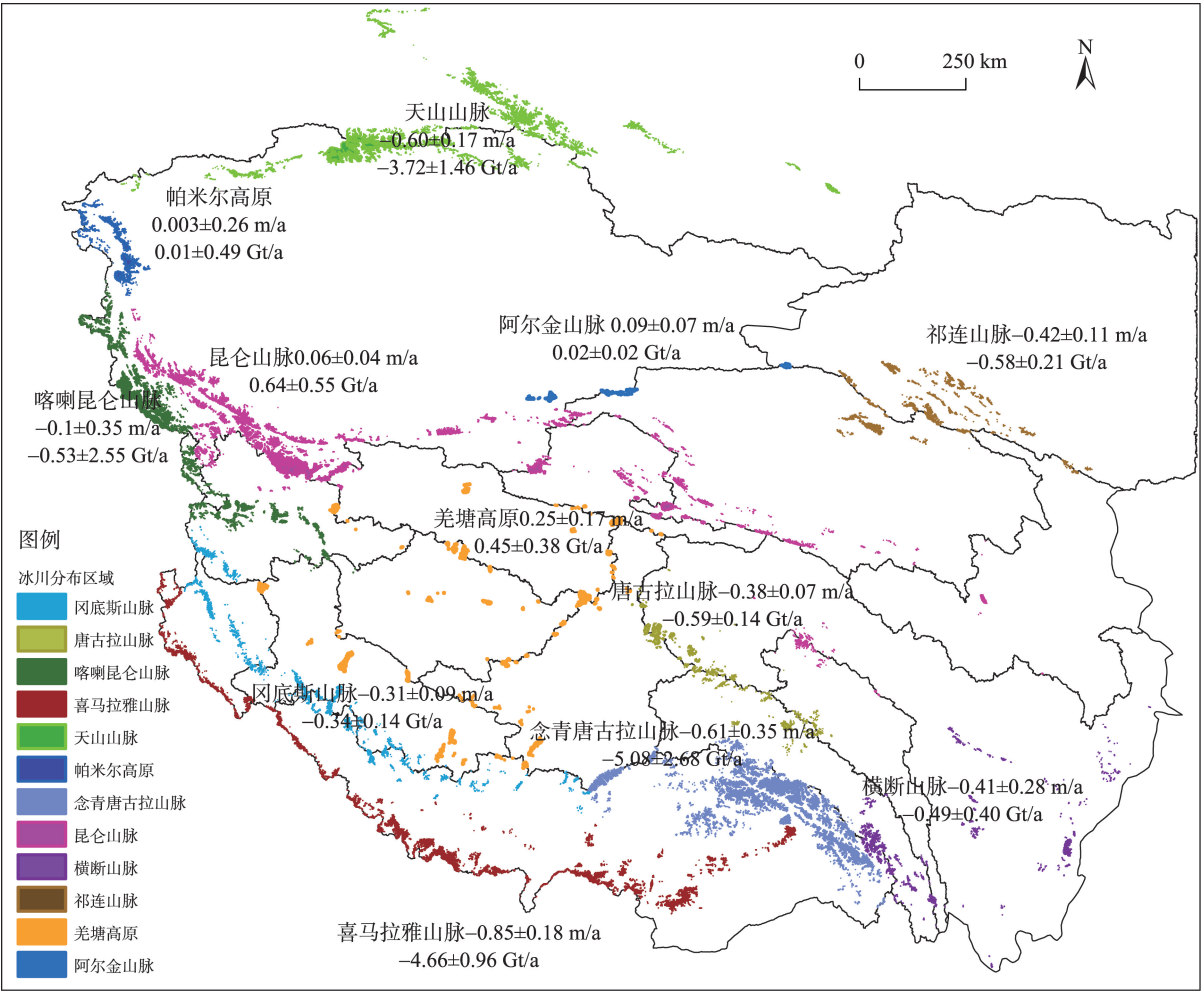


图1 青藏高原2003–2009年各山系冰川变化

Fig.1 Glacier changes in the major mountains on the Tibetan Plateau from 2003 to 2009

表3 青藏高原主要山系冰面高程变化研究结果列表

Tab.3 Results of glacier surface elevation changes in the major mountains on the Tibetan Plateau					
区域/冰川名称	观测方法	时段	冰面高程变化/(m/a)	数据来源	
阿尔金山脉	ICESat/GLAS	2003–2009	0.09 ± 0.07	本研究	
冈底斯山脉	ICESat/GLAS,SRTM	2003–2009	-0.44 ± 0.26	文献[71]	
冈底斯山脉	ICESat/GLAS	2003–2009	-0.31 ± 0.09	本研究	
喀喇昆仑山脉	ICESat/GLAS	2003–2009	-0.10 ± 0.06	文献[78],本研究	
昆仑山脉	ICESat/GLAS	2003–2009	0.06 ± 0.04	本研究	
念青唐古拉山脉西段	ICESat/GLAS,SRTM	2000–2008	0.49 ± 0.27	文献[79]	
	CryoSat-2,SRTM	2000–2013	-0.55 ± 0.31	文献[79]	
念青古仁河口冰川	差分GPS	2007–2011	-0.85	文献[24]	
帕米尔高原	ICESat/GLAS,SRTM DEM、SPOT DEM	2000–2010	-0.16 ± 0.15	文献[70]	
祁连山羊龙河1号冰川	地形图与GPS	1956–2007	-0.40 ± 0.22	文献[80]	
祁连山羊龙河5号冰川	地形图与GPS	1956–2007	-0.33 ± 0.22	文献[80]	
祁连山老虎沟12号冰川	地形图与GPS	1957–2007	-0.37 ± 0.11	文献[81]	
祁连山宁缠河3号冰川	地形图与GPS	1972–2009	-0.25	文献[82]	
祁连山脉	ICESat/GLAS,SRTM	2000–2009	-0.35 ± 0.26	文献[83]	
羌塘高原	ICESat/GLAS,SRTM	2003–2009	0.44 ± 0.26	文献[71]	
	ICESat/GLAS	2003–2009	0.25 ± 0.17	本研究	

续表 3

区域/冰川名称	观测方法	时段	冰面高程变化/(m/a)	数据来源
唐古拉山脉	ICESat/GLAS	2003-2009	-0.38±0.07	本研究
天山山脉	ICESat/GLAS	2003-2009	-0.58±0.21	文献[2]
横断山脉	ICESat/GLAS、SRTM DEM、SPOT DEM	2000-2010	-0.39±0.16	文献[70]
	ICESat/GLAS	2003-2009	-0.41±0.28	本研究
藏东南(包括横断山脉和念青唐古拉山脉东南段)	ICESat/GLAS、SRTM	2003-2009	-1.34±0.29	文献[69]
喜马拉雅山脉东段与中段	ICESat/GLAS	2003-2009	-0.78±0.27	文献[71]
喜马拉雅山脉东段	ICESat/GLAS	2003--2009	-0.89±0.18	文献[2]
喜马拉雅山脉中段	ICESat/GLAS	2003-2009	-0.44±0.20	文献[2]
喜马拉雅山脉西段	ICESat/GLAS	2003-2009	-0.53±0.13	文献[2]
喜山中段珠峰绒布流域	ALOS/PRISM DEM, 1:5 万 DEM	1974-2006	-0.52±0.06	文献[74]
	ALOS/PRISM DEM 与 SRTM DEM	2000-2006	-0.85±0.30	文献[84]
喜山中段希夏邦马峰地区	SPOT DEM、SRTM	2000-2007	-0.45±0.11	文献[85]
希夏邦马峰抗物热冰川	差分 GPS	2007-2010	-0.85	文献[24]
	差分 GPS	2009-2010	-0.76	文献[24]
喜马拉雅山脉西段纳木那尼冰川	ICESat/GLAS、SRTM	2000-2009	-0.63±0.32	文献[75]
	DGPS 实测	2008-2010	-0.67	文献[24]
	DGPS 实测	2008-2013	-0.42	文献[24]
	DGPS 实测	2009-2013	-0.58±0.06	文献[38]

在于不同传感器提供了不同特征的观测,如光学遥感的地物光谱特征、微波遥感的全天候观测、激光雷达高度计较准确的地面测高、雷达差分干涉更准确的地表形变监测、重力卫星的质量变化观测等。综合利用这些有效观测,可以克服单一传感器在信息提取及反演中的许多局限,从冰川面积变化、长度变化、厚度变化、质量变化等方面全面了解冰川变化状况。但卫星观测仍需要与实测结合,包括传统冰川物质平衡、差分 GPS、历史地形图及探地雷达测厚等。多平台数据观测的交叉验证,是综合集成趋势之一。

此外,冰储量变化研究,还有不少基于模型模拟的工作在开展,如通过冰川面积、长度和体积之间的关系拟合、建立冰储量计算经验公式^[50,89],或者根据度日因子、能量平衡、冰川动力学等特征,从机理上建立冰川消融模型^[90]。

因此,多平台遥感监测、模型模拟、实测验证与预测的综合与集成研究是冰川变化目前面临的最大挑战之一,需要填补知识上的不足,在全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、虚拟地理环境(VGE)^[91]等技术支持下,与不同专业领域、多学科交叉的专家通力合作,研究、预测不同尺度气候变化影响下的冰储量变化及其对水文循环过程、水资源、海平面上升等方面的贡献与影响,是目前冰冻

圈变化国际学术前沿研究热点之一。

参考文献(References):

[1] Pachauri R K, Meyer L A. IPCC, climate change 2014: synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014:151.

[2] Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, *et al.* A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009[J]. *Science*, 2013,340(6134):852-857.

[3] 姚檀栋,刘时银,蒲健辰,等.高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J].中国科学(D辑:地球科学), 2004,34(6):535-543. [Yao T D, Liu S Y, Pu J C, *et al.* High Asian recent glaciers recession and its influence of the water resources in northwest[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2004,34(6):535-543.]

[4] 沈永平,苏宏超,王国亚,等.新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II):灾害效应[J].冰川冻土,2013,35(6):1355-1370. [Shen Y P, Su H C, Wang G Y, *et al.* The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): hazards effect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013,35(6):1355-1370.]

[5] 陈晓清,崔鹏,杨忠,等.喜马拉雅山中段波曲流域冰湖溃决危险性分析与评估[J].冰川冻土,2007,29(4):509-516. [Chen X Q, Cui P, Yang Z, *et al.* Risk assessment of gla-

- cial lake outburst in the Poiqu River Basin of Tibet autonomous region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007,29(4):509-516.]
- [6] Yao T D, Thompson L, Yang W, *et al.* Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012,2(9): 663-667.
- [7] 陈宜瑜. 全球变化与社会可持续发展[J]. *地球科学进展*, 2003,18(1):1-3. [Chen Y Y. Global change and social sustainable development[J]. *Advance in Earth Science*, 2003, 18(1):1-3.]
- [8] Gilbert G K. *Glaciers and glaciation-harriman Alaska expedition*[M]. New York: Doubleday, Page and Company, 1903.
- [9] Meier M F. Contribution of small glaciers to global sea-level[J]. *Science*, 1984,226 (4681):1418-1421.
- [10] 孙作哲, 陈建明. 采用重复地面立体摄影测量方法测定冰川的变化[J]. *冰川冻土*, 1980(S1):54-56. [Sun Z Z, Chen J M. Measurement on variation of glacial surface[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1980,S1:54-56.]
- [11] Bindschadler R. Monitoring ice sheet behavior from space [J]. *Reviews of Geophysics*, 1998,36(1):79-104.
- [12] Meier M F. Evaluation of ERTS imagery for mapping and detection of changes in snow cover on land and on glaciers, in symposium on significant results obtained from the earth resources technology satellite- 1[C]. Washington, DC: NASA, 1973:863-875.
- [13] Bindschadler 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.
- [14] Shi J, Dozier J. Measurement of snow and glacier covered areas by single-polarization SAR[J]. *Annals of Glaciology*, 1993,17:72-76.
- [15] Kargel J S. Compositional controls on the geological behavior of icy satellites, and a call for more lab data[C]. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2006.
- [16] Li Z X, He Y Q, Jia W X, *et al.* Response of "glaciers-run-off" system in a typical temperate-glacier, hailuoguo glacier in gongga mountain of china to global change[J]. *Scientia Geographica Sinica/Dili Kexue*, 2008,28(2):229-234.
- [17] Kääb A, Huggel C, L Fischer, *et al.* Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005,5(4):527-554.
- [18] Ye Q H, Kang S C, 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.
- [19] 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.
- [20] 曹梅盛, 李新, 陈贤章, 等. *冰冻圈遥感*[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [Cao M S, Li X, Chen X Z, *et al.* *Cryosphere remote sensing*[M]. Beijing: Science Press, 2006.]
- [21] Kääb A. Glacier volume changes using ASTER satellite stereo and ICESat GLAS laser altimetry. a test study on Edgeøya, eastern Svalbard[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2008,46(10):2823-2830.
- [22] 井哲帆, 姚檀栋, 王宁练. 普若岗日冰原表面运动特征观测研究进展[J]. *冰川冻土*, 2003,25(3):288-290. [Jing Z F, Yao T D, Wang N L. The surface flow features of the puruogangri ice field[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003,25(3):288-290.]
- [23] Shangguan D, Liu S, Ding Y, *et al.* Thinning and retreat of Xiao Dongkemadi glacier, Tibetan Plateau, since 1993 [J]. *Journal of Glaciology*, 2008,54:949-951.
- [24] Tian L, J Zong, T Yao, *et al.* Direct measurement of glacier thinning on the southern Tibetan Plateau (Gurenhekou, Kangwure and Naimona'nyi glaciers)[J]. *Journal of Glaciology*, 2014,60(223):879-888.
- [25] 陈建明, 刘潮海, 金明燮. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(4):331-336. [Chen J M, Liu C H, Jin M X. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the urumqi river [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996,18(4): 31-336.]
- [26] 李震, 秦翔. 雷达高度计探测东南极地区冰面变化[J]. *冰川冻土*, 2003,25(3):268-271. [Li Z H, Qin X. Ice surface variation in east antarctica surveyed by satellite altimetry [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003,25(3): 268-271.]
- [27] Pieczonka T, Bolch T, Junfeng W, *et al.* Heterogeneous mass loss of glaciers in the aksu-tarim catchment (central Tien Shan) revealed by 1976 KH-9 hexagon and 2009 SPOT-5 stereo imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,130:233-244.
- [28] Van Niel T G, McVicar T R, Li L, *et al.* The impact of misregistration on SRTM and DEM image differences[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(5):2430-2442.
- [29] METI/ERSDAC NASA/LPDAAC USGS/EROS, Nuth C, Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change[J]. *Cryosphere*, 2011,5(1):271-290.

- [30] Zwally H J, B Schutz, Abdalati W, *et al.* ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002,34(3-4):405-445.
- [31] Braun A, Fotopoulos G. Assessment of SRTM, ICESat, and survey control monument elevations in Canada[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(12):1333-1342.
- [32] Zhang G Q, Xie H J, Kang S C, *et al.* Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003- 2009) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(7):1733-1742.
- [33] Bamber J L, Rivera A. A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination[J]. *Global Planet Change*, 2007,59(1-4):138-148.
- [34] Korona E, Berthier M, Bernard, *et al.* SPIRIT. SPOT 5 stereoscopic survey of polar ice: reference images and topographies during the fourth international polar year (2007- 2009)[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009,64(2):204-212.
- [35] 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 (4):463-474.
- [36] Narama C, Kääb A, Kajiura T, *et al.* Spatial variability of recent glacier area and volume changes in central Asia using Corona, Landsat, ASTER and ALOS optical satellite data[J]. *Geophysical Research Abstract*, 2007,9(08178): 1607-7962.
- [37] Zhu D, Tian L, Wang J, *et al.* Rapid glacier retreat in the Naimona'nyi region, western Himalayas, between 2003 and 2013[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014 (083508):1-8.
- [38] 王超. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [Wang C. Spaceborne synthetic aperture radar interferometry[M]. Beijing: Science Press, 2002.]
- [39] 程晓, 范湘涛, 王长林, 等. 基于 JERS-1 雷达干涉测量的南极冰盖信息提取[J]. 极地研究, 2005, 17(2): 99-106. [Cheng X, Fan X T, Wang CH I, *et al.* Application of jers-1 sar interferometry in antarctic grovemountain for glacier study [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2005, 17(2): 99-106.]
- [40] Goldstein E H, Kamp B. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an antarctic ice stream[J]. *Science*, 1993, 262: 1525-1530.
- [41] Neckel N, Braun A, Kropáček J, *et al.* Recent mass balance of Purogangri ice cap, central Tibetan Plateau, by means of differential X-band SAR interferometry[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2013, 7(2): 1119-1139.
- [42] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M, *et al.* The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31 (9): L09067.
- [43] 施雅风, 苏珍. 天山乌鲁木齐河源冰川的形态特征与历史演变[M]. 北京: 科学出版社, 1964. [Shi Y F, Su Z H. Tianshan mountain glacier in urumqi river head of morphological characteristics and historical evolution[M]. Beijing: Science Press, 1964.]
- [44] 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. [Qin D H, Chen Y Y, Li X Y. China's climate and environmental evolution (volume 1: the predictions of climate and environment evolution) [M]. Beijing: Science Press, 2005.]
- [45] 施雅风. 中国冰川与环境 - 现在、过去和未来[M]. 北京: 科学出版社, 2000. [Shi Y F. Glaciers and environment in China-present, past and future[M]. Beijing: Science Press, 2000.]
- [46] Yang W, Yao T, Guo X, *et al.* Mass balance of a maritime glacier on the southeast Tibetan Plateau and its climatic sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(17): 9579-9594.
- [47] 康世昌, 陈锋, 叶庆华, 等. 1970-2007年西藏念青唐古拉峰南、北坡冰川显著退缩[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 869-873. [Kang S C, Chen F, Ye Q H. Glacier retreating dramatically on the Mt. Nyainqüntanglha during the last 40 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(6): 869-873.]
- [48] Ma L, Tian L, Pu J, *et al.* Recent area and ice volume change of Kangwure Glacier in the middle of Himalayas [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(20): 2088-2096.
- [49] 米德生, 罗祥瑞. 利用陆地卫星象片量测冰川变化[J]. 冰川冻土, 1983, 5(1): 71-78. [Mi D S, Luo X R. Using landsat image measurement glacier change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(1): 71-78.]
- [50] 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. [Liu S Y, Shen Y P, Sun X W. Glacier variation since the maximum of the little ice age in the western Qilian mountains, northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 227-233.]
- [51] 曾群柱, 陈贤章. 冰川与积雪动态的遥感监测[J]. 遥感信息, 1990(2): 28-29. [Zeng Q Z, Chen X Z. Ice and snow dynamic remote sensing monitoring[J]. *Remote Sensing Infomation*, 1990, 2: 28-29.]
- [52] 叶庆华, 陈锋, 姚檀栋, 等. 近30年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 511-520. [Ye Q H, Chen F, Yao T D, *et al.* Tu-

- pu of glacier variations in the Mt. Naimona'Nyi region, western Himalayas, in the last three decades[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007,11(4):511-520.]
- [53] 李震,曾群柱.合成孔径雷达影像提取雪盖信息研究[J]. *环境遥感*,1996(3):200-205. [Li Z, Zeng Q Z. The method study of snow-cover mapping with SAR image[J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1996(3):200-205.]
- [54] 施雅风.简明中国冰川目录[M].上海:上海科学普及出版社,2005. [Shi Y F. Concise Chinese glacier catalogue[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005.]
- [55] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等.基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J].*地理学报*,2015(1):3-16. [Liu S Y, Yao X J, Guo W Q, *et al.* The contemporary glaciers in China based on the second Chinese glacier inventory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015,1:3-16.]
- [56] Guo W, Liu S, Yao X, *et al.* The second Chinese glacier inventory: data, methods and results[J]. *Journal of Glaciology*, 2015,61(226):357-372.
- [57] 任贾文,秦大河,井哲帆.气候变暖使珠穆朗玛峰地区冰川处于退缩状态[J].*冰川冻土*, 1998,24(1):87-92. [Ren J W, Qin D H, Jing Z F. Climatic warming causes the glacier retreat in Mt. Qomolangma[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998,24(1):87-92.]
- [58] Wang P, Li Z Q, Gao W Y. Rapid shrinking of glaciers in the middle Qilian mountain region of northwest China during the last similar to 50 years[J]. *Journal of Earth Science*, 2011,22(4):539-548.
- [59] 曹泊.祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[D].兰州:兰州大学,2013. [Cao B. Glacier variation in the Lenglongling range of eastern Qilian mountains[D]. Lanzhou: University of Lanzhou, 2013.]
- [60] 李珊珊,张明军,李忠勤,等.1960-2009年中国天山现代冰川末端变化特征[J].*干旱区研究*, 2013(2):378-384. [Li S S, Zhang M J, Li Z Q, *et al.* Variation of glacier terminuses in the Tianshan mountains, China, during the period of 1960-2009[J]. *Arid Zone Research*, 2013,2:378-384.]
- [61] 鲁安新,姚檀栋,刘时银,等.青藏高原各拉丹冬地区冰川变化的遥感监测[J].*冰川冻土*,2002,24(5):559-562. [Lu A X, Yao T D, Liu S Y, *et al.* Glacier change in the Geladandong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002,24(5):559-562.]
- [62] 蒲健辰,姚檀栋.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. [Pu J C, Yao T D. Pu-rugangri 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.]
- [63] Ye Q H, Zhong Z, Kang S, *et al.* Monitoring glacier and supra-glacier lakes from space in Mt. Qomolangma region of the Himalayas on the Tibetan Plateau in China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009,6(3):211-220.
- [64] 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. [Jin R, Che T, Li Xin, *et al.* Glacier variation in the Pumqu basin derived from remote sensing data and GIS technique[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004,26(3):261-266.]
- [65] Li X, Cheng G, Jin H, *et al.* Cryospheric change in China [J]. *Global and Planetary Change*, 2008,62(3-4):210-218.
- [66] Kääb A, Berthier E, Nuth C, *et al.* Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas[J]. *Nature*, 2012,488(7412):495-498.
- [67] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century[J]. *Nature Geoscience*, 2012,5(5):322-325.
- [68] Bolch T, Kulkarni A, Kaab A, *et al.* The state and fate of Himalayan glaciers[J]. *Science*, 2012,336(6079):310-314.
- [69] Fujita K, Nuimura T. Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(34):14011-14014.
- [70] Gardelle, Berthier, Arnaud, *et al.* Region-wide glacier mass balances over the Pamir- Karakoram-Himalaya during 1999-2011[J]. *The Cryosphere*, 2013(7):975-1028.
- [71] Neckel N, Kropáček J, Bolch T, *et al.* Glacier mass changes on the Tibetan Plateau 2003-2009 derived from ICESat laser altimetry measurements[J]. *Environmental Research Letters*, 2014,9(1):014009(1-7).
- [72] Holzer N, Vijay S, Yao T, *et al.* Four decades of glacier variations at Muztag Ata (Eastern Pamir): a multi-sensor study including Hexagon KH-9 and Pléiades data[J]. *The Cryosphere Discuss.*, 2015,9(2):1811-1856.
- [73] Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, *et al.* Glacier changes in the Koshi River basin, central Himalaya, from 1976 to 2009, derived from remote-sensing imagery[J]. *Annals of Glaciology*, 2014,55(66):61-68.
- [74] Ye Q H, T Bolch, Naruse R, *et al.* Glacier mass changes in Rongbuk catchment on Mt. Qomolangma from 1974 to 2006 based on topographic maps and ALOS PRISM data [J]. *Journal of Hydrology*, 2015,530:273-280.
- [75] 宗继彪,叶庆华,田立德.基于ICESat/GLAS,SRTM DEM和GPS观测青藏高原纳木那尼冰面高程变化(2000-2010年)[J].*科学通报*,2014,21:2108-2118. [Zong J B, Ye Q H, Tian L D. Recent Naimona'Nyi Glacier surface elevation changes on the Tibetan Plateau based on ICESat/GLAS, SRTM DEM and GPS measurements[J]. *Chinese*

- Science Bulletin (Chinese Version), 2013,58:2108-2118.]
- [76] Moholdt G, Nuth C, Hagen J O, *et al.* Recent elevation changes of Svalbard glaciers derived from ICESat laser altimetry[J]. Remote Sensing of Environment, 2010,114(11):2756-2767.
- [77] Huss M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change[J]. Cryosphere, 2013, 7(3):877-887.
- [78] Kääb A, Treichler D, Nuth C, *et al.* Brief communication: contending estimates of 2003-2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya[J]. The Cryosphere, 2015,9(2):557-564.
- [79] 赵永利.念青唐古拉西段冰储量变化的遥感估算[D].北京:中国科学院大学,2014. [Zhao Y L. The ice reserves change estimation in Nyenchen tanglha using remote sensing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2014.]
- [80] Shangguan D, Liu S, Ding Y, *et al.* Changes in the elevation and extent of two glaciers along the Yanglonghe river, Qilian Shan, China[J]. Journal of Glaciology, 2010,56(196):309-317.
- [81] Zhang Y, Liu S, Shangguan D, *et al.* Thinning and shrinkage of Laohuguo No.12 glacier in the western Qilian mountains, China, from 1957 to 2007[J]. Journal of Mountain Science, 2012,9(3):343-350.
- [82] 刘宇硕,秦翔,张通,等.祁连山东段冷龙岭地区宁缠河3号冰川变化研究[J].冰川冻土,2012, 34(5):1031-1036. [Liu Y S, Qin X, Zhang T, *et al.* Variation of the Ningchan river glacier no.3 in the Lenglongling range, east Qilian mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012,34(5):1031-1036.]
- [83] 王玉哲,任贾文,秦大河,等.利用卫星资料反演区域冰川冰量变化的尝试——以祁连山为例[J].冰川冻土,2013, 35(3):583-592. [Wang Y Z, Ren J W, Qin D W, *et al.* Regional glacier volume changes derived from satellite data: a test study on Qilian mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013,35(3):583-592.]
- [84] Ye Q, Zong J. Glacier melting is accelerated in the Rongbuk catchment on Mt. Qomolangma (Everest)[J]. Journal of Glaciology, in submission.
- [85] 赵瑞.希夏邦马峰地区冰川储量变化时空特征的遥感研究[D].北京:中国科学院大学,2015. [Zhao R. Glacier reserve of Xixiabangma peak area changes in time and space features of remote sensing research[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2015.]
- [86] Paul F, Haeberli W. Spatial variability of glacier elevation changes in the Swiss Alps obtained from two digital elevation models[J]. Geophysical Research Letters, 2008,35(21):189-203.
- [87] Nuth C, Kaab A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change[J]. Cryosphere, 2011,5(1):271-290.
- [88] 黄秉维.地理学的一些最主要的趋势[J].地理学报,1960, 26(3):149-154. [Huang B W. Some of the most main trend of geography[J]. Acta Geographica Sinica, 1960,26(3):149-154.]
- [89] 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. [Shi Y F. 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.]
- [90] Yang K, Wu H, Qin J, *et al.* Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review[J]. Global and Planetary Change, 2014, 112(11):79-91.
- [91] 林琿,陈旻.利用虚拟地理环境的实验地理学方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2014,39(6):689-694,700. [Lin H, Chen M. Experimental geography based on virtual geographic environments(VGEs)[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014,39(6):689-694,700.]