

引用格式: 贾伟,王静爱,史培军,等.青藏高原冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测研究现状与展望[J].地球信息科学学报,2021,23(10):1715-1727.
[Jia W, Wang J A, Shi P J, et al. The progress and prospect of remote sensing monitoring of rocky desert dynamic changes in the ice and snow melting area of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geo-information Science, 2021,23(10):1715-1727.] DOI:10.12082/dqxxkx.2021.210149

青藏高原冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测研究现状与展望

贾伟¹,王静爱^{2,3},史培军^{3,4*},马伟东¹

1. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 3. 青海师范大学高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008; 4. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875

The Progress and Prospect of Remote Sensing Monitoring of Rocky Desert Dynamic Changes in the Ice and Snow Melting Area of the Qinghai-Tibet Plateau

JIA Wei¹, WANG Jing'ai^{2,3}, SHI Peijun^{3,4*}, MA Weidong¹

1. School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 4. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau is sensitive to climate change. At present, relevant researches mostly focus on the dynamic changes of ice and snow in the Qinghai-Tibet Plateau, and seldom pay attention to the dynamic changes of the rocky desert left by the melting ice and snow. Through the earth-atmosphere interaction, rocky desert may change the regional heterogeneity of climate at a large scale. This paper sorted out the extraction methods of remote sensing monitoring of ice and snow melting and rocky desert dynamic changes in the Qinghai-Tibet Plateau, and analyzed the advantages, disadvantages and applicability of various remote sensing data and extraction methods. We also summarized the data and research methods of the dynamic monitoring of ice and snow and the dynamic changes of the rocky desert in the Qinghai-Tibet Plateau. At present, the remote sensing monitoring data of the snow and ice dynamic changes in the Qinghai-Tibet Plateau are diverse and the research methods are mature. However, the remote sensing monitoring of the rocky desert dynamic changes left by the melting ice and snow has not yet formed a systematic study. Besides, under the condition of insignificant human disturbance, the dynamic changes of the rocky desert in the ice and snow melting area can also be used as a supplement to remote sensing monitoring of ice and snow dynamic changes.

Key words: rocky desert; melting area of ice and snow; remote sensing monitoring; extraction method; research concept; Qinghai-Tibet Plateau

*Corresponding author: SHI Peijun, E-mail: spj@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-05-14.

基金项目: 青海省自然科学基金项目(2021-ZJ-905); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0606)。[**Foundation items:** Natural Science Foundation of Qinghai Province, No.2021-ZJ-905; The Second Qinghai-Tibet Plateau Scientific Expedition and Research Program (STEP), No.2019QZKK0606.]

作者简介: 贾伟(1988—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 博士生, 讲师, 主要从事裸地遥感研究。E-mail: jiawei1212@126.com

*通讯作者: 史培军(1959—), 男, 陕西榆林人, 博士, 教授, 主要从事灾害与风险研究。E-mail: spj@bnu.edu.cn

摘要:青藏高原作为地球第三极增温明显,相关研究多集中于青藏高原冰雪动态,很少关注冰雪消融后岩漠的变化。岩漠通过地气相互作用影响着全球气候变化的区域差异。本文通过梳理青藏高原冰雪、冰雪消融区、岩漠动态变化遥感监测方法体系,着重分析了各遥感数据来源及提取方法的优缺点和适用性,并对基于遥感技术条件下青藏高原冰雪动态监测、冰雪消融区岩漠动态变化监测的数据来源、研究方法与技术进行了总结。目前,青藏高原冰雪动态变化遥感监测数据来源多样、研究方法成熟,而冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测尚未形成系统研究。在人为干扰不明显背景下,青藏高原冰雪消融区岩漠的动态变化,在一定程度上也可作为对冰雪变化遥感监测的补充。

关键词:岩漠;冰雪消融区;遥感监测;提取方法;研究构想;青藏高原

1 引言

IPCC第五次全球气候评估报告指出,1880—2012年全球平均气温上升了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。如果以目前的速度继续上升,全球变暖可能在2030—2052年之间达到 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。高纬度和高海拔地区易受全球气候变暖因素的影响,而青藏高原作为地球的第三极,受全球气候变暖影响十分明显^[3]。近50年(1961—2010年)来青藏高原气温升高倾向率达到了 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[4],远高于全球的增暖水平($0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 1956—2005年)^[5],且研究时段距今越近,气温升高倾向率越大^[6-7]。温度的大幅度升高同时带来了冰川及冰盖消融、海平面上升等问题。

根据RGI6.0冰川边界数据统计,青藏高原冰川面积占世界冰川面积的11.8%^[8-9],由于冰雪的高反照率和相变潜热及巨大的冰储量,冰冻圈在地球气候系统中发挥着极为重要的作用^[3]。自20世纪以来,随着全球气候逐渐变暖,青藏高原及其周围的冰川全面退缩^[10],不同区域退缩幅度存在明显差异^[11]。同时,青藏高原积雪呈下降趋势,积雪覆盖

日数和雪深明显下降^[12]。冰川退缩、积雪消融使得岩石裸露于地表,形成岩漠。岩漠通过地气相互作用影响全球气候变化的区域差异,岩漠的扩张会增加当地土壤侵蚀、水土流失等自然灾害发生的概率,这对高原气候、水文和生态环境都产生重大影响,同时对高原生态环境保护及土地资源合理开发利用也带来了巨大挑战。

遥感具有宏观性、时效性强和低成本的特点,适宜作为区域岩漠动态变化监测的主要数据来源和技术手段。但遥感数据来源、提取方法的多样性,使得冰雪消融、岩漠动态变化监测结果之间存在“变化噪声”等不确定性问题,如何确定冰雪消融区岩漠动态变化监测的遥感数据源及提取方法是本文探讨的核心。本文基于环境遥感理论基础,梳理青藏高原冰雪消融、岩漠动态变化遥感监测方法与技术体系,重点对青藏高原冰雪动态变化、冰雪消融后岩漠动态变化和基于遥感地类提取方法进行了综述(图1),以为青藏高原冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测提供科学方法与技术支撑。

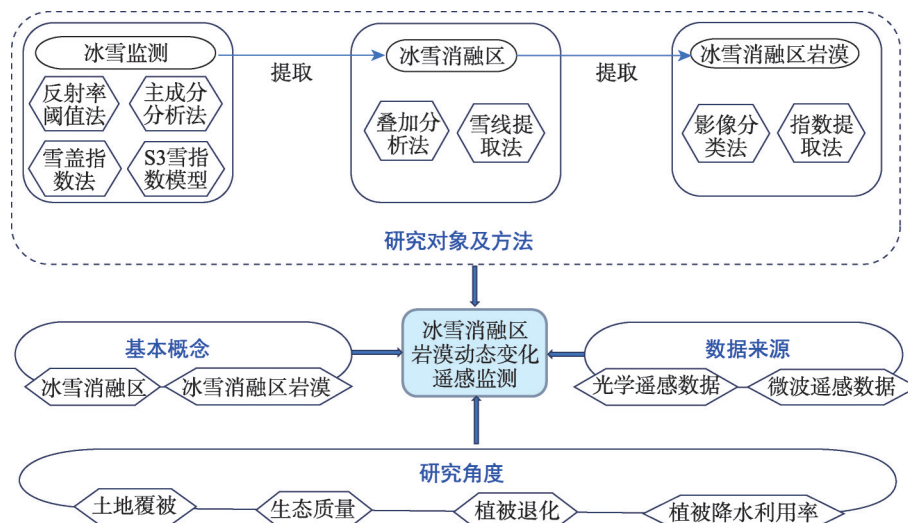


图1 冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测研究进展综述框架

Fig. 1 An overview framework of remote sensing monitoring of rocky desert dynamic changes in the Ice and Snow Melting Area

2 冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测研究透视

荒漠区岩石裸露的山地,称为岩漠,也叫“石质荒漠”^[13]。本文所研究的冰雪消融区岩漠是指在以增暖为主要特征的全球气候变化背景下,由冻融侵蚀、重力侵蚀、风力侵蚀和流水侵蚀等自然因素及人为因素共同作用造成冰盖和雪盖退缩的区域为冰雪消融区。冰雪消融区的基岩裸露,岩石表层剥落和崩解,形成岩块和岩屑的地貌,为冰雪消融区岩漠。根据冰雪消融区地表风化物颗粒的大小,可分为裸岩、裸砾、裸石、裸沙和裸土(图2)。地表物质控制着水和能量通量分配,在气候系统中起着至关重要的作用,与大气之间相互作用是气候的重要驱动因素^[14]。下垫面性质变化伴随着陆面参数改变,通过能量分配反馈给大气,影响近地表气候,近地表温度响应尤其敏感,不仅会引起大气环流变动,甚至会影响区域乃至全球气候^[15]。

虽然目前未见关于青藏高原冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测的文献,而在21世纪初已有学者尝试使用遥感手段,从土地利用、生态质量评价、植

被退化及植被降水利用等角度对青藏高原的荒漠化进行了监测。

(1)土地利用角度。张佩民等^[16]利用MSS、ETM+影像,对青藏高原1970s—1990s荒漠化土地的砂砾质荒漠化和盐碱质荒漠化的空间分布和演变规律进行了综合分析,指出30年来荒漠化土地虽然总体面积变化不大,但荒漠化的程度却明显加重;于海洋等^[17]利用1976年的MSS数据和2000年TM遥感数据,对西藏境内的沙质荒漠化和盐质荒漠化土地现状与动态变化进行监测,得出西藏土地荒漠化程度呈明显加重趋势;李庆等^[18]以2015年OLI影像为基础,监测青藏高原沙漠化土地分布现状,指出沙漠化土地主要包括沙质沙漠化土地、砾质沙漠化土地和风蚀残丘3种类型,集中分布在高原北部和西部地区,其他地区零散分布;自东南向西北,沙漠化土地面积逐渐增大,沙漠化程度不断加重。

(2)生态质量评价角度。封建民等^[19]利用2005年TM影像,对黄河源区沙漠化现状和特征进行了研究,得出黄河源区是近年来沙漠化发展较快的地区之一,黄河源区今后的生态治理过程应以沙漠化快速发展的玛沁县、玛多县和曲麻莱县为综合治理

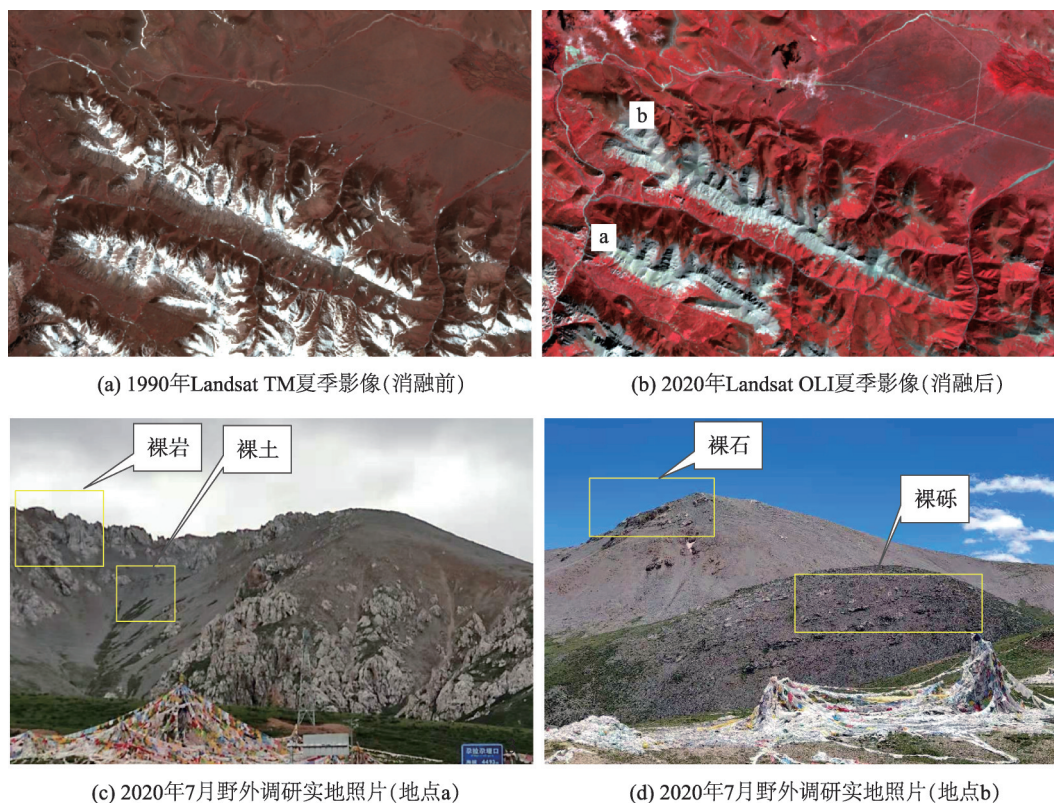


图2 青藏高原玉树州尕拉垭口冰雪消融区岩漠分布情况

Fig. 2 Distribution of rocky desert in Borogkala mountain pass, Yushu, Tibetan, China

重点区;张瑞江^[20]利用青藏高原现代冰川雪线的遥感调查与监测结果,对高原40多年来由于现代冰川雪线的变化而引发的冻土、荒漠化、地质灾害等生态地质环境问题进行了分析,并对可能产生的生态环境和气候问题的初步探讨表明,从长期看,冰冻圈萎缩,水资源减少,湖泊和湿地面积缩减,生态退化已是青藏高原冰冻圈变化的基本事实。

(3)植被退化角度。吕爱锋等^[21]以2000—2012年MODIS的增强型植被指数产品(EVI)的植被覆盖度为主要评价指标,对青海省荒漠化现状和动态变化进行快速监测,结果显示,在研究时段内,青海省荒漠化土地的空间分布特征没有明显变化,荒漠化和潜在荒漠化土地总面积没有明显变化趋势,但面积年际波动明显;而重度荒漠化土地面积整体呈明显下降趋势,区域荒漠化状况有所改善。拉巴等^[22]基于MODIS数据的NDVI产品构建了西藏荒漠化监测模型,并分析了2000—2017年全区土地荒漠化的时空分布特征和趋势变化,近18年全区荒漠化趋势呈微弱改善态势,植被整体上长势较好且波动小。

(4)植被降水利用率(RUE)角度。在干旱地区,降水、土壤有效湿度和植被生产能力之间有着重要的关联性,净初级生产力主要由年降雨量决定,RUE可为探索植被初级生产力对降水和土地利用的时空变化响应提供了有效措施,该指标被广泛应用在荒漠化的评价中^[23]。张博^[24]以植被降水利用率作为青海省土地荒漠化的遥感监测指标,分析了青海省土地荒漠化的变化趋势及主要影响因素,得出未来青海省的退化趋势将有所缓解。

从目前已有的监测结果来看,从土地利用角度,通过划分荒漠化类型对高原荒漠化进行监测,从生态质量评价、植被退化、植被降水利用率角度是从荒漠化程度对高原荒漠化进行监测。另一方面,从土地利用和生态质量评价角度,开展对高原荒漠化的监测,多以中等分辨率的Landsat系列卫星数据源为基础,监测结果为整体荒漠化持续加重、且以生态退化为主。从植被退化和植被降水利用率角度,多以低空间分辨率的MODIS数据和NDVI产品为主要数据源,监测结果显示青藏高原荒漠化趋势呈微弱的改善态势。可见,使用不同遥感数据源、采用不同遥感监测技术方法及指标体系可能引起监测结果的不确定性。针对青藏高原荒漠化的监测研究虽已取得一定成果,但缺少对冰川退缩和积雪消融形成的岩漠及其变化的关注。在

人为干扰不明显背景下,青藏高原冰雪消融区岩漠的动态变化,在一定程度上可作为冰雪变化遥感监测的补充。

3 冰雪消融区岩漠监测遥感数据源的选择

冰雪消融区岩漠监测的数据源以冰雪消融区的数据源为基础,而冰雪消融区的数据源以冰雪监测的数据源为基础。故要确定岩漠监测的数据源首先要确定冰雪监测的数据源,进一步分析该数据源是否满足岩漠的提取需求。1960s以前,对于地类的监测主要以地面台站、野外定点考察和航空像片为数据源,这些监测方式需投入巨大的时间、人力和财力,但监测范围小、可重复性差^[25-26]。同时,由于绝大部分山地冰雪和消融后的岩漠分布于高海拔地区,自然环境恶劣且分布范围广、数量多,观测台站多建于地势较为平坦的城镇周边及河谷地区,空间连续性较差^[27],野外定点考察和航空摄影测量也无法在高寒高海拔地区实施^[28-29],难以对冰雪和冰雪消融后的岩漠进行大范围高时效监测。

自1960s起,卫星遥感技术革新了冰雪研究领域,充分满足了全球冰雪监测的迫切需求,成为目前全球尺度冰雪持续观测的主要技术手段^[30-31],同时为冰雪消融后岩漠的监测提供了有效的数据支撑。遥感,特别是卫星遥感资料在对地综合观测系统中的作用越来越大,不同空间分辨率、波谱分辨率、辐射分辨率、时间分辨率和覆盖范围的卫星及传感器日益增多,大大提高了对地类的监测能力,在冰雪动态、冰雪消融区岩漠监测中发挥着重要作用,大范围乃至全球积雪覆盖信息获取比陆地常规观测更加及时有效,弥补了常规观测覆盖范围小及投入较大等不足。

目前,主要的冰雪产品有:美国海洋和大气管理局(NOAA)基于AVHRR研发的自1966年以来北半球每周积雪范围产品,空间分辨率为160 km^[32]。美国国家雪冰数据中心(NSIDC)采用被动微波数据SSM/I,发布的1995年以来实时逐日全球冰密集度与积雪范围产品,空间分辨率为25 km^[33];基于MODIS传感器发布的2000年以来逐日、8 d合成积雪二值产品和积雪面积比例产品,空间分辨率均为500 m^[34]。中国气象局利用FY-1/MVISR,结合NOAA/AVHRR资料发布的1996—2010年中国区域积雪范围旬产品,空间分辨率为5 km;采用FY-3卫

星 MERSI 和 VIRR 资料生成的 2008 年以来全球 MULSS 日/旬/月积雪范围产品,空间分辨率为 1 km^[35]。这些冰雪遥感监测产品的空间分辨率较低,多用于区域、半球及全球尺度冰雪的监测,冰雪消融区面积有限,岩漠提取使用已有冰雪产品数据难以高精度识别。

3.1 冰雪、冰雪消融区岩漠监测的光学遥感数据源 利用光学遥感监测冰雪,最早始于 1960s,通过

TIROS-1 气象卫星观测加拿大东部积雪情况^[36]。随着 1972 年陆地资源卫星 Landsat 系列卫星(美国)的发射,使高精度监测冰雪及动态变化成为可能。此后,SPOT 系列(法国)、Terra(美国)、IKONOS(美国)、Quickbird(美国)、GF 系列(中国)的相继发射,为各尺度范围的冰雪监测提供了丰富的数据源。随着遥感技术发展,冰雪光学遥感数据日益丰富。以下对常用光学遥感冰雪监测数据源的参数、特点及应用研究进行归纳总结(表 1)。

表 1 冰雪监测常用光学遥感数据源及其应用研究

Tab. 1 Summary of application research on commonly used optical remote sensing data for ice and snow melting monitoring

遥感卫星/传感器	空间分辨率/m	重访周期/d	波段数/个	发射年份	数据源特点	应用研究
Terra/Aqua MODIS (MOD10A/ MOD10C)	500	8/1(合成)	1	1999	低空间分辨率、较高的时间分辨率、单景覆盖范围广	广泛应用于区域、半球及全球尺度的冰雪提取研究 ^[37] ;受限于空间分辨率,对冰雪消融区岩漠识别难度较大。难获得高精度的提取结果
Landsat1-3/ MSS	78	18	4	1972	中等空间分辨率、较高的辐射量化等级和时间分辨率;1.50~1.75 um	提取精度较高;单景影像覆盖范围广(184 km×184 km),已成为国内外观测冰川变化的主要光学遥感数据源之一 ^[39] ,适用于冰雪消融区岩漠的提取,目前多用于中小区域的监测
Landsat4-5/ TM	30	16	7	1982		
Landsat7/ ETM+	30/15(全色)	16	8	1999		
Landsat8/ OLI	30/15(全色)	16	11	2013		
SPOT1-3/ HRV	20/10(全色)	26	4	1986	中、高等空间分辨率,且空间分辨率类型多;全色波段可达到米级	提取精度较高;但影像幅宽小(60 km×60 km)且数据价格昂贵,适用于冰雪消融区岩漠的提取,多用于小区域的监测中
SPOT4-5/ HRG	10/2.5(全色)	26	5	2002		
SPOT6-7/ HRG	6/1.5(全色)	26	5	2012		
IKONOS	4/1(全色)	1~3	5	1999	高等空间分辨率,可达米级、甚至亚米级;时间序列较短	提取精度高;数据价格高昂,且波段范围较窄,不利于云和雪的区分,可通过目视解译对冰雪消融区岩漠进行检测,多用于小范围的监测及精度评价
Quickbird	2.44/0.61(全色)	1~6	5	2001		
GF-1/6	16/8/2(全色)	41	9	2013		
GF-2	4/1(全色)	5	5	2014		

3.2 冰雪、冰雪消融区岩漠监测的微波遥感数据源

微波在冰雪遥感中处于不可缺少的位置,它不受天气状况的影响,可以穿透云雾,对地表也具有一定穿透能力,可全天候、全天时对地表进行监测,为常年多云地区的冰雪监测提供了有效手段^[40]。1993 年 Goldstine 等^[41]首次利用 ERS-1 卫星,使用 SAR 干涉测量方法监测了南极冰川的流动速度。1990s 起, JERS(日本)、ENVISAT(欧空局)、ALOS(日本)、Radarsat(加拿大)等一系列微波遥感卫星相继发射,为冰雪的监测提供了更为丰富的遥感数据源(图 3)。

上述微波遥感数据主要采用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来反映冰雪的变化^[42]。而微波遥感卫星所搭载传感器的工作波长以长波为主,有一定穿透能

力,多应用于雪深和雪水当量的信息提取^[43]。同时,微波遥感的主要传感器 SAR 根据冰雪的介电常数、粗糙度等物理特性的不同,可将干雪与湿雪分

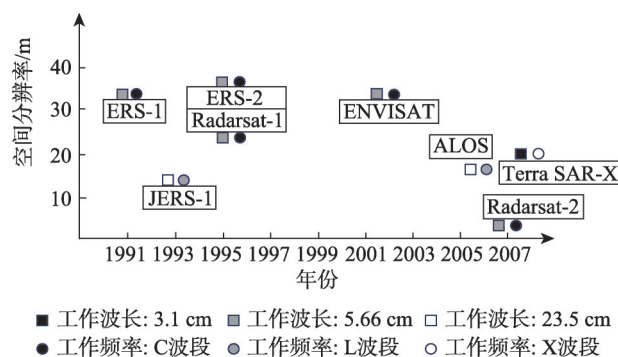


图 3 冰雪监测常用微波遥感数据

Fig. 3 Microwave remote sensing data commonly used in ice and snow melting monitoring

开,并能估算冰雪的密度、湿度等冰雪参数^[44]。但微波遥感的图像处理技术较为复杂,在冰雪消融、冰雪覆盖范围退缩等方面的处理效率要低于光学遥感。同时,微波遥感记录光谱特征信息的能力较低,解译识别较为困难,不适用于冰雪消融区岩漠的监测。

3.3 青藏高原冰雪消融区岩漠遥感监测数据源的选择

1990s 以来,开始采用遥感手段对青藏高原冰雪覆盖范围、冰雪动态变化进行监测,主要以对冰雪年际变化^[45]、季节变化^[46]、空间分布规律及动态变化^[47]、影响因素^[48]等方面进行监测分析,而忽视了对冰雪消融区及冰雪消融区岩漠的监测。使用的数据源主要有 Landsat 系列卫星、MODIS 数据。对于整个高原的冰雪遥感监测以低空间分辨率的 MODIS 数据为主,Pu 等^[49]基于 MODIS 数据的 8 d 合成积雪产品研究了青藏高原 2000—2006 年的积雪变化,积雪分布总体上随海拔的升高而增加,且受坡度、坡向和曲率等地形因子的影响,研究时段内高原积雪呈微弱下降趋势。除多等^[50]利用 2000—2014 年 MOD10A2 积雪产品和数字高程模型 DEM 数据,提取了西藏高原的积雪空间分布范围,指出积雪的空间分布差异显著,中东部念青唐古拉山和周边高山积雪丰富且覆盖率高,而南部河谷和羌塘高原中西部积雪少且覆盖率低。唐志光等^[51]将青藏高原典型地区的 ETM+ 数据作为“真值”,验证了通过 MODIS 积雪产品获得的青藏高原积雪覆盖面积的精度。

青藏高原冰雪监测另一常用数据来源为 Landsat 系列卫星,但由于该系列卫星空间分辨率较高,数据量较大,多数学者以青藏高原典型区为样区对冰雪动态变化开展研究,如针对祁连山中中部^[48]、阿里西部地区^[52]、念青唐古拉山脉西段^[53]、岗日嘎布地区^[54]、西昆仑山^[55]、东昆仑山木孜塔格峰^[56]、冈底斯山^[57]、布喀达坂峰^[58]、喜马拉雅山^[59]、喜马拉雅山西段杰纳布流域^[60]等区域冰雪动态变化的遥感监测。但目前仍鲜有利用 Landsat 系列卫星资料数据对整个青藏高原冰雪动态变化、冰雪消融及冰雪消融岩漠开展监测研究。

青藏高原冰雪动态变化监测的数据来源主要以光学遥感数据为主,其中高时间分辨率的 MODIS 数据和较高空间分辨率的 Landsat 系列卫星数据最为常用。提取精度上,Landsat 系列卫星数据明显优于 MODIS 数据,且 Landsat 系列卫星可连续提

供自 1972 年以来全球地表覆被信息,更适用于长时间尺度的冰雪动态监测。同时,Landsat 系列卫星数据较高的辐射量化等级(OLI 为 12 bit)提供了更为丰富的地类信息,更适用于岩漠的监测。

4 冰雪、冰雪消融区及岩漠的遥感提取方法

4.1 冰雪的遥感提取方法

针对现有数据,国内外学者提出了多种高原冰雪信息提取方法。主要是根据地物的光谱特征差异,利用冰雪在可见光波段的高反射率,通过图像增强,扩大冰雪与其他地物的光谱信息差异得到冰雪二值图,通过冰雪二值图统计冰雪覆盖率。对于大区域快速冰雪监测,主要采用反射率阈值法、主成分分析法、雪盖指数法和 S3 雪指数模型等方法。

(1)反射率阈值法。该方法为基于一种经验统计的方法,其原理是冰雪在可见光波段的光谱反射率高于其他地物,通过对比冰雪和其他地物的亮度直方图,确定冰雪像元的亮度阈值。但因时相、大气传输、地形等诸多因素的影响,即使同一区域每一景图像冰雪的阈值都不尽相同。同时,该方法受主观性影响较大,精度较差,且易受云盖的干扰^[61]。

(2)主成分分析法。通过 K-L(Karhunen Loeve)变换生成互不相关的输出波段,达到隔离噪声和减少数据集维数的方法。由于多波段数据常具有高度相关性,信息冗余严重,主成分变换寻找一个原点在数据均值的新坐标系,通过坐标轴的旋转使数据的方差达到最大,从而生成互不相关的输出波段。通常情况下,第一主成分分量可包含所有波段中 90% 的方差信息,故该方法是基于图像信息增强的角度对冰雪信息进行增强处理,最终仍需要结合监督分类、雪盖指数等分类方法达到快速、准确的冰雪信息提取^[62]。

(3)雪盖指数法。归一化差值积雪指数(Normalized Difference Snow Index, NDSI),由 Hall 等^[63]提出,是根据积雪在可见光波段有很强的反射率,但随着波长的增加反射率逐渐降低,在短波红外(SWIR)波段反射率急剧下降,低于一般地物的特性,选择雪的可见光强反射波段和短波红外低反射波段进行归一化处理,以突出冰雪的特性(式(1))。

$$NDSI = \frac{B_{\text{green}} - B_{\text{SWIR}}}{B_{\text{green}} + B_{\text{SWIR}}} \quad (1)$$

式中: B_{green} 、 B_{SWIR} 分别为绿色和短波红外波段的反射率值。经大气校正后,若积雪覆盖度近似或大于50%,对不同传感器NDSI阈值均可取0.4^[64];但积雪和植被混合区域NDSI阈值需降低为0.1~0.4^[65]。

(4)S3雪指数模型。S3雪指数模型由日本科学家 Saito 和 Yamazaki^[66]提出,在NDSI所用波段的基础上引入对植被敏感的近红外波段,考虑冰雪和植被在不同波段的反射特性,有效减少植被覆盖对冰雪像元识别的影响,进一步提高植被覆盖下雪盖制图的精度(式(2))。

$$S3 = \frac{B_{\text{NIR}}(B_{\text{red}} - B_{\text{SWIR}})}{(B_{\text{NIR}} + B_{\text{red}})(B_{\text{NIR}} + B_{\text{SWIR}})} \quad (2)$$

式中: B_{red} 、 B_{NIR} 、 B_{SWIR} 分别为红色、近红外和短波红外波段的反射率值。在积雪覆盖区,S3的阈值需 ≥ 0.18 ;而在积雪与植被混合区,S3值一般在0.05~0.18之间^[67]。

为了进一步确定各冰雪提取方法的适用性,对上述方法的适用性进行总结(表2)。

4.2 冰雪消融区的遥感提取方法

冰雪消融区面积有限,季节变化分明,故而用来进行冰雪消融区提取的遥感影像应以中、高空空间分辨率遥感影像为主,日期选用优先选取冰川消融季末期,因为该时间段积雪覆盖面积接近于终年积雪覆盖面积,避免了季节性积雪带来的干扰。在提取时可选用冰雪覆盖叠加分析法和基于雪线提取法。

(1)冰雪覆盖叠加分析法。通过气象站点数据资料确定研究区内研究年份中的最热日,选取最热日后一段时间内的多时相遥感影像,基于冰雪覆盖提取结果,对多时相的冰雪制图结果进行面积最小化合成,提取最能代表一年中融雪末期的“最小化”冰雪面积作为终年冰雪面积的“真值”^[68]。2个年份

冰雪覆盖数据的交集为积雪保持区,差集为积雪消融区。该方法的优势在于可快速确定冰雪消融区范围,但确定的范围整体性较差,可能包含较多的破碎图斑。

(2)基于雪线提取法。雪线为消融期末积雪存在的下限,是区分地球陆地表面积雪覆盖区与无雪覆盖区的分界线^[69],雪线作为现代冰川消融的一个重要指标,雪线上部终年积雪覆盖,雪线的下部在夏季积雪消融^[70]。利用遥感影像观测到的雪线是季节雪线(Seasonal Snow Line),也称瞬时雪线(Transient Snow Line, TSL),它随季节而变化,冬季低,夏季高^[71]。通过消融季末期遥感影像获取的雪线,大致类似于冰川物质平衡线。本方法基于遥感数据的2期冰雪覆盖测算结果提取雪线,由2期雪线确定冰雪消融区范围。该方法确定冰雪消融区范围整体性较好,连续性较强。

4.3 岩漠的遥感提取方法

岩漠是荒漠化的一种,岩漠的提取可参照土地荒漠化信息提取的遥感方法。主要有基于影像分类法和指数提取法。影像分类法通过岩漠与其他地类间的光谱信息、纹理特征的差异进行区分,指数提取法是以岩漠与其他地类间反射率特征的差异进行区分。

(1)影像分类法

基于影像分类法包括目视解译、基于像元的计算机分类方法和面向对象的分类方法等。目视解译^[72]是专业人员直接观察或借助一定的工具判读仪器从遥感图像获取特定目标地物信息的过程,其优点是所需设备少,节省资源,其缺点是需要大量的人力,耗费时间较多,判断结果会有较强的主观性。

基于像元的计算机分类方法^[73]主要有非监督和监督图像分类法,根据地物类型的光谱特征进行

表2 冰雪提取方法的适用性和局限性

Tab. 2 Applicability and limitations of ice and snow extraction methods

提取方法	适用性	局限性	使用建议
反射率阈值法	操作简单、可用于波段信息少的数据	阈值选取困难,阴影区误分和“椒盐”现象严重、水域误分严重	卫星遥感数据不完整时使用
主成分分析法	可减少数据冗余,工作量减小	处理后冰川信息模糊,各类地物的可分性不明显且易漏提	数据量较大、波段信息冗余严重时使用
雪盖指数法	精度较高,可消除阴影区的影响、阈值易确定	少量云被误分,植被覆盖区提取效果差	空间尺度较大或植被覆盖面积较少的情况下
S3雪指数模型	精度较高,可消除植被光谱的影响、阈值易确定	少量云被误分	植被覆盖较高的情况下

提取,依据待提取地类光谱特征的相似度进行区分,通过对像元灰度的相似性进行统计分类实现地物信息的提取。该方法能较好地解决小样本、非线性、高维数据和局部极小等实际问题,加之其易用、稳定和具有相对较高的精度的特点,应用较为广泛,但忽略了影像中各地类内部间的相互关联。

面向对象分类法^[74]以通过对影像整体进行分割后所生成的对象为研究目标,其对象的大小由影像分割尺度与空间结构所决定。在信息提取时不仅考虑影像的光谱特征差异,更多的考虑到影像中地物的纹理、形状等空间特征及各对象间的关系结构信息等。该方法核心技术是影像的分割算法,通过分割所产生的影像对象能够实现从二维的影像信息阵列中还原接近目标地物真实景观场景中的的空间形态及其排列方式,而后续的地类信息提取也是基于分割所生产的影像对象进行的,应用潜力较大。

(2) 指数提取法

指数提取法主要包括基于植被指数和非植被指数。植被指数主要有归一化植被指数(NDVI)、差值植被指数(DVI)、增强植被指数(EVI)和修改型土壤调节植被指数(MSAVI)等^[75-76],基于植被指数提取岩漠的主要思路是:①依据植被指数构建植被覆盖度模型,通过阈值划分将植被覆盖度为0或接近于0区域作为荒漠区或岩漠区;②依据植被指数估算植被覆盖率,在单位面积的冰雪消融区内,若植被覆盖率为X%,则岩漠区为1-X%。

非植被指数如归一化基岩指数(NDRI)、裸露

土壤指数(BSI)、表层土壤粒径指数(TGSI)都发展于植被指数基础之上^[77-78],充分考虑基岩、裸土不同于植被的反射率特点构建像元二分模型,可直接用于检测荒漠区或岩漠区,已在我国西南地区石漠化的监测中得以广泛应用。因利用单一指标监测土地荒漠化有很多局限性,因此选用多个指标来监测和分析土地荒漠化成为目前的主流方法。

4.4 青藏高原冰雪消融区岩漠提取研究构想

青藏高原地域辽阔,地形复杂,本文提出气候变化背景下,基于海拔、地形等限制条件确定冰雪消融区范围、多种遥感影像分类等多方法融合,提取青藏高原岩漠动态变化的研究构想。研究思路为根据确定的研究时段,以 Landsat 系列卫星资料为主要数据源,数字高程模型 DEM 为辅助数据。首先,通过海拔、地形等限制条件预设冰雪分布的范围。同时,对 Landsat 资料进行图像预处理,主要包括辐射校正、几何校正、镶嵌与裁剪等,其中辐射校正消除大气所产生的图像辐射畸变,几何校正消除几何位置上所产生的图像几何畸变;接着,选定雪盖指数法和 S3 雪指数模型提取方法得到相应年份的冰雪覆盖数据,其差集则为积雪消融区;然后,基于像元分类法、面向对象分类法、单指数、多指数提取法和多方法融合提取岩漠的空间分布,并通过野外实地验证评价精度,确定岩漠提取最佳方法或最佳方法组合;最后,基于 GIS 空间叠加分析方法得到研究时段内岩漠动态变化(图4)。

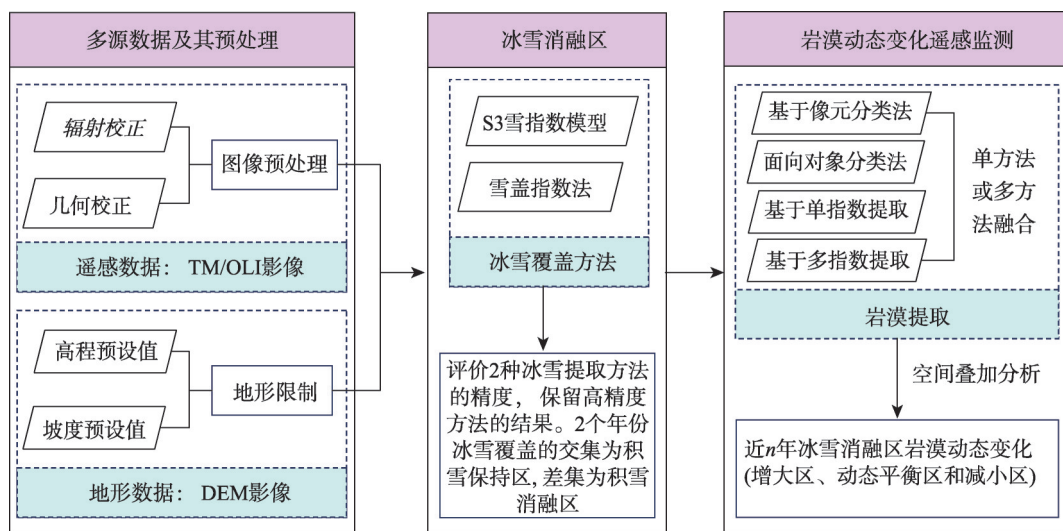


图4 地形限制条件下岩漠动态变化遥感提取研究构想

Fig. 4 Research concept of remote sensing extraction of rocky desert dynamic changes based on topographic constraints

5 展望

青藏高原作为地球第三极增温明显,而增温的区域生态环境变化显著。其中,青藏高原冰雪的大面积大幅度消融即是较为直观的生态环境响应。冰雪消融后,基岩裸露,在多重动力侵蚀作用下形成了岩漠,这种下垫面性质的改变通过地气相互作用影响着全球气候变化的区域差异,所以研究青藏高原气候变暖导致的冰雪消融区岩漠动态变化及其与气候的相互关系,对更加全面地认识青藏高原对全球变化的响应及其生态环境效应意义重大。已有研究多集中于直接监测冰川、雪盖,但冰川、积雪厚度的监测需要使用微波遥感数据源及相应的技术方法,微波图像特有的畸变,校正过程复杂,对信息处理和资料分析判读技术难度高,而已经裸露于地表的岩漠更容易被识别,可选用光学遥感数据源,利用其波谱反射率较高的特点构建相应的提取技术体系,故以冰雪消融后岩漠的动态变化来揭示区域自然环境改变对全球气候变化的响应是可行的。

当前,不同空间、时间、波谱和辐射分辨率的遥感数据源多样,基于雪盖指数法和S3雪指数模型等遥感冰雪提取方法成熟,结果可信,通过冰雪覆盖叠加分析法和基于雪线法确定的冰雪消融区提取易于实现,采用基于影像分类法、指数法及多方法融合提取岩漠理论上可行,这些为冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测提供了强有力的数据及技术支持。故而在遥感科学、地理信息科学的空间分析方法支持下,研发基于海拔等地形限制条件确定冰雪消融区范围、多种遥感影像、多分类方法融合,提取岩漠的新方法具有可操作性,可将现有研究中对冰雪动态变化监测转化到对冰雪消融区岩漠的遥感监测上来,为青藏高原对全球变化的响应研究提供新的思路。

在未来研究中,以冰雪消融后岩漠的动态变化来揭示区域自然环境改变对全球气候变化的响应是青藏高原冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测的重要目标。在研究过程中,需要重点关注:对青藏高原冰雪消融、岩漠动态变化进行长时间尺度监测来分析岩漠动态变化的格局及过程;依据岩漠动态变化遥感监测结果揭示其机理;对全球和区域自然环境变化的适应及其效应。具体工作中,应充分整合Landsat系列、SPOT系列等中、高空间分辨率遥

感数据源,依据其空间分辨率和波谱分辨率较高的特点,选择发射时间较早、时间序列较长的卫星影像资料,对青藏高原冰雪消融、岩漠动态变化进行长时间尺度监测;机理分析时结合气象、农牧等自然和社会经济数据分析岩漠动态变化的自然和人为影响因素,进一步阐述自然和人为因素的作用过程及贡献率;适应问题研究需探讨人类活动对全球变化的适应能力及其与区域可持续发展的关系。以此为青藏高原在全球变化背景下,建设低碳社会、高吸收碳经济先行区,促进区域可持续发展提供科学参考。

6 结论

本文基于环境遥感理论基础,通过梳理冰雪、冰雪消融区、岩漠动态变化遥感监测方法体系,着重分析了各遥感数据来源及提取方法的优缺点和适用性,并对基于遥感技术条件下青藏高原冰雪消融区岩漠监测遥感数据源的选择,冰雪、冰雪消融区及岩漠的遥感提取方法与技术进行了总结。主要结论如下:

(1)青藏高原冰雪面积呈迅速缩减趋势,而冰雪消融区岩漠动态变化遥感监测尚未形成系统研究。人为干扰不明显背景下的青藏高原冰雪消融区岩漠动态变化,在一定程度上可作为冰雪变化遥感监测的补充。虽然从土地利用、生态质量评价、植被退化、植被降水利用等角度对青藏高原土地荒漠化进行了遥感监测,但对冰雪消融后岩漠动态变化及区域自然环境改变对全球气候变化的响应等重要科学问题的遥感监测研究亟待加强。

(2)青藏高原冰雪动态变化遥感监测数据来源多样,研究方法成熟。光学遥感效率优于微波遥感,更适用于整个青藏高原冰雪动态变化监测。光学遥感数据中,低空间分辨率的MODIS数据因其具有较高的时间分辨率,多应用于整个高原或高原内大范围区域的冰雪监测,对冰雪消融区岩漠识别难度较大。中等空间分辨率的Landsat系列数据具有较高的空间分辨率、辐射量化等级和时间分辨率,同时可连续提供自1972年以来全球的冰雪分布信息,是高原内区域冰雪监测的主要遥感数据源之一,也适用于对冰雪消融区岩漠的监测。高分辨率遥感卫星虽空间分辨率可达到米级甚至亚米级,但接收的波谱范围较窄,不利于云和雪的区分,多用

于小范围冰雪监测及使用中低空间分辨率监测时的精度评价。利用Landsat系列数据对整个青藏高原长时间尺度冰雪消融、岩漠动态变化监测是今后监测研究的重点。

(3)通过冰雪提取方法获取冰雪消融范围区的技术体系日趋完善,岩漠提取方法需在实践中进一步验证。对于大区域快速冰雪监测的反射率阈值法、主成分分析法、雪盖指数法及S3雪指数模型,在提取精度上,雪盖指数法、S3雪指数模型优于反射率阈值法、主成分分析法。在应用中,雪盖指数法适用于空间尺度较大或植被覆盖面积较少的情况,S3雪指数模型适用于对提取精度要求较高,植被覆盖较高的情况。本文提出的岩漠动态变化研究构想有待在今后的研究中进一步验证。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Bongaarts J. Intergovernmental panel on climate change special report on global warming of 1.5°C Switzerland: IPCC, 2018[J]. Population and Development Review, 2019,45(1):251-252.
- [3] 秦大河,周波涛,效存德.冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J].气象学报,2014,72(5):869-879. [Qin D H, Zhou B T, Xiao C D. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014,72(5):869-879.]
- [4] 吴成启,唐登勇.近50年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征[J].水土保持研究,2017,24(6):262-266,272. [Wu C Q, Tang D Y. Change of temperature in the Tibetan Plateau in the context of global warming in recent 50 Years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6):262-266,272.]
- [5] IPCC (2007). Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [6] 史培军,孙劭,汪明,等.中国气候变化区划(1961-2010年)[J].中国科学:地球科学,2014,44(10):2294-2306. [Shi P J, Sun S, Wang M, et al. Climate change regionalization in China (1961-2010)[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(10):2294-2306.]
- [7] 宋辞,裴韬,周成虎.1960年以来青藏高原气温变化研究进展[J].地理科学进展,2012,31(11):1503-1509. [Song C, P T, Zhou C H. Research progresses of surface temperature characteristic change over Tibetan Plateau since 1960[J]. Progress in Geography, 2012,31(11):1503-1509.]
- [8] Scherler D, Leprince S, Strecker M. Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery- Accuracy improvement and quality assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(10):3806-3819.
- [9] 姚檀栋.青藏高原南部冰川变化及其对湖泊的影响[J].科学通报,2010,55(18):1749. [Yao T D. Glacier changes and their effects on lakes in the southern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2010,55(18):1749.]
- [10] 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. The recent retreat of Gaoyaian Glacier and its impact on water resources in Northwest China[J]. Science in China Ser. D Earth Sciences, 2004,34(6):535-543.]
- [11] 王宁练,姚檀栋,徐柏青,等.全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J].中国科学院院刊,2019,34(11):1220-1232. [Wang N L, Yao T D, Xu B Q, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019,34(11):1220-1232.]
- [12] 车涛,郝晓华,戴礼云,等.青藏高原积雪变化及其影响[J].中国科学院院刊,2019,34(11):1247-1253. [Che T, Hao X H, Dai L Y, et al. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019,34(11):1247-1253.]
- [13] 地质矿产部地质辞典办公室.地质大辞典[M].北京:地质出版社,2005. [Encyclopedia of Geology Office of the Ministry of Geology and Mineral Resources. Encyclopedia of Geology[M]. Beijing: Geological Publishing, 2005.]
- [14] Gevaert A I, Miralles D G, De J R, et al. Soil moisture-temperature coupling in a set of land surface models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017 (123):1481-1498.
- [15] 李宏宇,符淙斌,郭维栋,等.干旱区不同下垫面能量分配机理及对微气候反馈的研究[J].物理学报,2015,64(5):438-451. [Li H Y, Fu C B, Guo W D, et al. Study of energy partitioning and its feedback on the microclimate over different surfaces in an arid zone[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(5):438-451.]
- [16] 张佩民,张振德,李晓琴,等.青藏高原荒漠化遥感信息提取及演变分析[J].干旱区地理,2006,29(5):710-717. [Zhang P M, Zhang Z D, Li X Q, et al. Desertification remote sensing information extraction from Qinghai-Tibet Plateau and evolution analysis[J]. Arid Land Geograph, 2006,29(5):710-717.]
- [17] 于海洋,张振德,张佩民,等.西藏土地荒漠化遥感监测[J].地球科学与环境学报,2007,29(3):316-320. [Yu H Y,

- Zhang Z D, Zhang P M, Monitoring of land desertification in Tibet based on RS[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2007,29(3):316-320.]
- [18] 李庆,张春来,周娜,等.青藏高原沙漠化土地空间分布及区划[J]. *中国沙漠*,2018,38(4):690-700. [Li Q, Zhang C L, Zhou N, et al. Spatial Distribution of Aeolian Desertification on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2018,38(4):690-700.]
- [19] 封建民,王涛.遥感和GIS支持下的黄河源区土地沙漠化研究[J]. *水土保持通报*,2008,28(2):116-120. [Feng J M, Wang T. Remote sensing and GIS analyses of sand desertification in the source region of the Yellow River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008,28(2):116-120.]
- [20] 张瑞江.青藏高原冰川演变与生态地质环境响应[J]. *中国地质调查*,2016,3(2):46-50. [Zhang R J. Glacier change and eco-geological environment response in Tibetan Plateau [J]. *Geological Survey of China*, 2016,3(2):46-50.]
- [21] 吕爱锋,周磊,朱文彬.青海省土地荒漠化遥感动态监测[J]. *遥感技术与应用*,2014,29(5):803-811. [Lv A F, Zhou L, Zhu W B. The remote sensing based dynamic Mmonitoring of land desertification in Qinghai Province[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014,29(5): 803-811.]
- [22] 拉巴,扎西欧珠,白玛央宗,等.基于MODIS数据的西藏荒漠化遥感监测研究[J]. *气象与环境科学*,2019,42(4):39-46. [La B, Zhaxi O Z, Baima Y Z, et al. Study on remote sensing monitoring of desertification in Tibet based on MODIS data[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2019,42(4):39-46.]
- [23] Moreno-De L H M, Bochet E, Monleón V, et al. Aridity induces nonlinear effects of human disturbance on precipitation- use efficiency of iberian woodlands[J]. *Ecosystems*, 2018,21(7):1295-1305.
- [24] 张博. 1999-2018年青海省土地荒漠化遥感监测及其驱动力分析[D].北京:中国地质大学,2020. [Zhang B. Remote sensing monitoring and driving force analysis of land desertification in Qinghai Province from 1999 to 2018[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.]
- [25] Meier, M F. Contribution of small glaciers to global sea level[J]. *Science*, 1984,226(4681):1418-1421.
- [26] 施雅风.山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望[J]. *地理学报*,1990,45(1):1-13. [Shi Y F. Glacier recession and lake shrinkage indicating the climatic warming and drying trend[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990,45(1):1-13.]
- [27] 黄晓东,郝晓华,杨永顺,等.光学积雪遥感研究进展[J]. *草业科学*,2012,29(1):35-43. [Huang X D, Hao X H, Yang Y S, et al. Advances in snow-cover monitoring using optical remote sensing[J]. *Pratacultural Science*, 2012,29(1): 35-43.]
- [28] Bindshadler, Robert. Monitoring ice sheet behavior from space[J]. *Reviews of Geophysics*, 1998,36(1):79-104.
- [29] 姚檀栋.高亚洲浅冰芯与气候环境变化研究[J]. *中国科学院院刊*,1998,13(5):3-5. [Yao T D. Research on high Asia shallow ice core and climate environment change[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 1998,13(5):3-5.]
- [30] F., Scipioni, F., et al. Spectroscopic classification of icy satellites of Saturn II: Identification of terrain units on Rhea[J]. *Icarus*, 2014,118(234):1-16.
- [31] Li Z X, He Y Q, Jia W X, et al. Response of "Glaciers-Runoff" system in a typical temperate-glacier, Hailuoguo glacier in Gongga Mountain of China to global change[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008,28(2):229-234.
- [32] Ramsay B H. The interactive multisensor snow and ice mapping system [J]. *Hydrological Processes*, 1998,12(10-11):1537-1546.
- [33] Tekeli A E, Snmez I, Erdi E. Snow-covered area determination based on satellite-derived probabilistic snow cover maps[J]. *Arabian Journal of Geocences*, 2016,9(3):1-11.
- [34] Zhang Y, Cao T, Xi K, et al. Spatial and temporal variation analysis of snow cover using MODIS over Qinghai-Tibetan Plateau during 2003-2014[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016,45(5):1-11.
- [35] 黄晓东,李旭冰,刘畅宇,等.青藏高原积雪范围和雪深/雪水当量遥感反演研究进展及挑战[J]. *冰川冻土*,2019,41(5):1138-1149. [Huang X D, Li X B, Liu C Y, et al. Remote sensing inversion of snow cover extent and snow depth /snow water equivalent on the Qinghai-Tibet Plateau: advance and challenge[J]. *Glaciology and Geocryology*, 2019,41(5):1138-1149.]
- [36] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Algorithm theoretical Basic document (ATBD) for the MODIS snow and sea Ice-mapping algorithms [R]. NASA, 2001.
- [37] 刘金平,张万昌,邓财,等. 2000-2014年西藏雅鲁藏布江流域积雪时空变化分析及对气候的响应研究[J]. *冰川冻土*,2018,40(4):643-654. [Liu J P, Zhang W C, Deng C, et al. Spatiotemporal variations of snow cover over Yarlung Zangbo River basin in Tibet from 2000 to 2014 and its response to key climate factors[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018,40(4):643-654.]
- [38] 于惠,张学通,冯琦胜,等.牧区积雪光学与微波遥感研究进展[J]. *草业科学*,2010,27(8):59-68. [Yu H, Zhang X T, Feng Q S, et al. Research progress on snow monitoring based on optical and microwave remote sensing in pastoral area[J]. *Pratacultural Science*, 2010,27(8):59-68.]
- [39] 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.
- [40] Congalton R G. Remote sensing and image interpretation 7th edition[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015,81(8):615.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 李新,车涛.积雪被动微波遥感研究进展[J].冰川冻土, 2007,29(3):487-496. [Li X, Che T. A review on passive microwave remote sensing of snow cover[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007,29(3):487-496.]
- [44] Shi J C, Dozier J, Rott H. Snow mapping in alpine regions with synthetic aperture radar[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 1994,32(1):152-158.
- [45] 梁鹏斌,李忠勤,张慧. 2001-2017年祁连山积雪面积时空变化特征[J].干旱区地理,2019,42(1):56-66. [Liang P B, Li Z Q, Zhang H. Temporal-spatial variation characteristics of snow cover in Qilian Mountains from 2001 to 2017 [J]. Arid Land Geography, 2019,42(1):56-66.]
- [46] 除多.2000-2014年西藏高原积雪覆盖时空变化[J].高原山地气象研究,2016,36(1):27-37. [Chu D. Spatial-temporal variations of snow cover on the Ti-bet Autonomous Region from 2000 to 2014 using MODIS data[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016,36(1):27-37.]
- [47] 刘玉莲,任国玉,于宏敏.中国降雪气候学特征[J].地理科学,2012,32(10):1176-1185. [Liu Y L, Ren G Y, Yu H M. Climatology of snow in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012,32(10):1176-1185.]
- [48] 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.
- [49] Pu Z, Xu L. MODIS/Terra observed snow cover over the Tibetan Plateau: distribution, variation and possible connection with the East Asian Summer Monsoon (EASM)[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2009,97(3-4):265-278.
- [50] 除多,达珍,拉巴卓玛.西藏高原积雪覆盖空间分布及地形影响[J].地球信息科学学报,2017,19(5):635-645. [Chu D, Da Z, Laba Z M. Spatio-temporal distribution patterns of snow cover on the Tibet and orographic impacts[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(5):635-645.]
- [51] 唐志光,王建,李弘毅,等.青藏高原MODIS积雪面积比例产品的精度验证与去云研究[J].遥感技术与应用,2013,28(3):423-430. [Tang Z G, Wang J, Li H Y, et al. Accuracy validation and cloud obscuration removal of MODIS fractional snow cover products over Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013,28(3):423-430.]
- [52] 燕云鹏,刘刚,刘建宇,等. 2013-2014年西藏阿里西部地区雪被覆盖遥感动态监测[J].国土资源遥感,2016,28(4):185-190. [Yan Y P, Liu G, Liu J Y, et al. Snow cover remote sensing monitoring in the west of Ngari area in northern Tibet from 2013 to 2014[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016,28(4):185-190.]
- [53] 张其兵,康世昌,张国帅.念青唐古拉山脉西段雪线高度变化遥感观测[J].地理科学,2016,36(12):1937-1944. [Zhang Q B, Kang S C, Zhang G S. Changes of snow line altitude for glaciers on western Nyainqentanglha Range observed by remote sensing[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016,36(12):1937-1944.]
- [54] 吴坤鹏,刘时银,郭万钦. 1980-2015年岗日嘎布地区冰川分布数据集[J].中国科学数据,2018,3(4):64-71. [Wu K P, Liu S Y, Guo W Q. A dataset of glacier distribution and glacier changes in the Kangri Karpo Mountains during 1980-2015[J]. China Scientific Data, 2018,3(4):64-71.]
- [55] Wang Y, Hou S, Huai B, et al. Glacier anomaly over the western Kunlun Mountains, Northwestern Tibetan Plateau, since the 1970s[J]. Journal of Glaciology, 2018,64(246):1-13.
- [56] 蒋宗立,张俊丽,张震,等. 1972-2011年东昆仑山木孜塔格峰冰川面积变化与物质平衡遥感监测[J].国土资源遥感,2019,31(4):128-136. [Jiang Z L, Zhang J L, Zhang Z, et al. Glacier change and mass balance (1972-2011) in Ulugh Muztagh, eastern Kunlun Mountains, monitored by remote sensing[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019,31(4):128-136.]
- [57] 刘娟,姚晓军,刘时银,等. 1970-2016年冈底斯山冰川变化[J].地理学报,2019,74(7):1333-1344. [Liu J, Yao X J, Liu S Y, et al. Glacier changes in the Gangdisê Mountains from 1970 to 2016[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(7):1333-1344.]
- [58] 高永鹏,姚晓军,刘时银,等. 1973-2018年布喀达坂峰地区前进冰川遥感监测[J].自然资源学报,2019,34(8):1666-1681. [Gao Y P, Yao X J, Liu S Y, et al. Remote sensing monitoring of advancing glaciers in the Bukatage Mountains from 1973 to 2018[J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(8):1666-1681.]
- [59] 冀琴,董军,刘睿,等. 1990-2015年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测及动因分析[J].地理科学,2020,40(3):486-496. [Ji Q, Dong J, Liu R, et al. Glacier changes in response to climate change in the Himalayas in 1990-2015 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2020,40(3):486-496.]

- [60] 寇勇,王宁练,陈安安,等. 1993-2016年喜马拉雅山西段杰纳布流域冰川变化遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2020,35(3):712-722. [Kou Y, Wang N L, Chen A A, et al. Monitoring variation of glaciers based on remote sensing images in the Chenab Basin, Western- Himalaya,1993-2016[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020,35(3):712-722.]
- [61] Wang J, W. L. Comparison of methods of snow cover mapping by analysing the solar spectrum of satellite remote sensing data in China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(21):4129-4136.
- [62] 上官冬辉.基于3S的塔里木河流域冰川变化应用研究[D].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007. [Shangguan D H. Application research on glacier change in Tarim River Basin based on 3S technology[J]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2007.]
- [63] Hall D K, Salomonson V V, Riggs G A. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 1995,54(2):127-140.
- [64] Xiao X, Shen Z, Qin X. Assessing the potential of VEGETATION sensor data for mapping snow and ice cover: A normalized difference snow and ice index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(13):2479-2487.
- [65] Klein A G, Hall D K, Riggs G A. Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model[J]. Hydrological Processes, 1998,12(10-11): 1723-1744.
- [66] Saito A, Yamazaki T. Characteristics of spectral reflectance for vegetation ground surfaces with snow-cover; vegetation indices and snow indices[J]. Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, 2009,12(1): 28-38.
- [67] Shimamura Y, Izumi T, Matsuyama H. Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation-comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006,27(21): 4867-4884.
- [68] 王晓茹,唐志光,王建,等.基于MODIS积雪产品的高亚洲融雪末期雪线高度遥感监测[J].地理学报,2020,75(3): 470-484. [Wang X R, Tang Z G, Wang J, et al. Monitoring of snowline altitude at the end of melting season in High Mountain Asia based on MODIS snow cover products[J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(3):470-484.]
- [69] 秦大河.冰冻圈科学辞典[M].北京:气象出版社,2016. [Qin D H. Cryosphere Science Dictionary[M]. Beijing: Meteorological Press, 2016.]
- [70] Wu S S, Yao Z J, Huang H Q, 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.
- [71] Klein A G, Isacks B L. Spectral mixture analysis of Landsat thematic mapper images applied to the detection of the transient snowline on tropical Andean glaciers[J]. Global & Planetary Change, 1999,22(1-4):139-154.
- [72] Qi Y B, Chang Q R, Jia K L, et al. Temporal-spatial variability of desertification in an agro-pastoral transitional zone of northern Shaanxi Province, China[J]. Catena, 2011,88(1):37-45.
- [73] Xue Z, Qin Z, Li H, et al. Evaluation of aeolian desertification from 1975 to 2010 and its causes in northwest Shanxi Province, China[J]. Global and Planetary Change, 2013(107):102-108.
- [74] 贾伟,高小红,杨灵玉,等.面向对象方法的复杂地形区地表覆盖信息提取[J].兰州大学学报(自然科学版),2018, 54(4):486-493. [Jia W, Gao X H, Yang L Y, et al. Land cover information extraction for complicated terrain regions via an object-oriented classification method[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2018,54 (4):486-493.]
- [75] He Y X, Yi G H, Zhang T, et al. The EVI trends and driving factors in Red River Basin affected by the “corridor-barrier” function during 2000-2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(6):2056-2064.
- [76] Javier T, Silva P V R M, Barbosa A A, et al. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000-2016[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018(73):197-206.
- [77] Huang Q, Cai Y. Mapping Karst Rock in Southwest China [J]. Mountain Research and Development, 2009,29(1):14-20.
- [78] Hao S, Jiang L, Shi J, et al. Assessment of MODIS-based fractional snow cover products over the Tibetan Plateau [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019,12(2):533-548.