

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2017.03.08

引用格式: 燕云鹏,刘刚,李瑜,等.西北边境地区冰冻圈遥感调查与监测(2013—2015年)主要进展[J].中国地质调查,2017,4(3): 51–56.

西北边境地区冰冻圈遥感调查与监测 (2013—2015年)主要进展

燕云鹏¹, 刘刚¹, 李瑜¹, 刘建宇¹, 王怿飞², 张博文², 韩聪²

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 2013—2015年由我国国土资源航空物探遥感中心牵头开展了中国地质调查局地质调查项目“西北边境地区国土资源遥感综合调查”,我国西北边境高寒、高海拔地区的冰冻圈遥感调查是其中一项重要内容。冰冻圈遥感调查的主要进展有:基于地形地貌、地温分布和坡度坡向特征等综合信息完成了藏北等地区的多年冻土范围调查;利用高分1号(GF-1)宽幅数据和Landsat数据,对2013年1月—2014年12月期间阿里西部地区近10 000 km²的积雪覆盖情况进行了连续19个期次的动态监测;基于1999—2013年间的Landsat多期影像,对班公湖和斯潘古尔湖冷季6个月份的湖冰覆盖情况进行了动态调查。

关键词: 西北边境; 冰冻圈; 遥感调查; 冻土; 雪被; 湖冰

中图分类号: TP79; P931.4; P931.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2017)03-0051-06

0 引言

中国地质调查局地质调查项目“西北边境地区国土资源遥感综合调查”2013—2015年间主要开展了基础地质与矿产、地形地貌与土地利用、冰冻圈遥感、地质灾害与交通信息及工程与水文地质等专题调查20余万km²^[1-2]。作为高寒高海拔地区,西北边境的冰冻圈遥感调查是其中一项重要内容。冰冻圈是指地球表层连续分布并具有一定厚度的负温圈层,亦称冰雪圈、冰圈或冷圈^[3]。在中国,一般将冰川和冻土合起来称为冰冻圈。本项目就西北边境地区国防专题和社会经济发展中的生产生活应用,选择了重点地区的冰雪覆盖历史变迁情况、冰雪覆盖下的道路通行状况、班公湖冷季湖冰冻结情况、冰缘地形地貌以及冻结层水与冻土冻岩等重点专题,开展了冰冻圈遥感调查与监测。基于高分辨率遥感影像数据开展了藏北地区冻土遥感调查,进行了多年冻土边界范围的划分和冰缘地形地貌的遥感解译,

完成了与冻土成因相关的地质灾害调查和冻结层水与冻土冻岩的圈定划分;利用2013年1月—2014年12月间的Landsat ETM和OLI中等分辨率卫星遥感数据,开展了阿里西部地区的雪被覆盖遥感监测,完成了重要通道地区冰雪覆盖下的道路通行状况遥感监测;基于1999—2013年间的Landsat多期影像,进行了班公湖和斯潘古尔湖冷季6个月时长的湖冰覆盖情况动态调查。

1 技术方法及主要成果

1.1 依托高分遥感影像开展了藏北等地区冻土调查

本次研究基于地形地貌、地温分布和坡度坡向特征等综合信息,完成了藏北地区的多年冻土范围调查。基于前人冻土边界模型得出的多年冻土下限结论,采用DEM数据提取海拔高程,结合遥感影像反演的地表温度,先进行藏北等地区冻土边界的初步划定;然后以地形地貌参数和地物高分遥感影像特征^[4]为依据,开展多年冻土边界的解译圈

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-11。

基金项目: 中国地质调查局“全国边防地区基础地质遥感调查(编号: DD20160076)”和“西北边境地区国土资源遥感综合调查(编号: 12120113003300)”项目联合资助。

第一作者简方数据(1977—),男,高级工程师,主要从事环境地质调查研究与地学数据库建设工作。Email: ypyan@sohu.com。

定；最终完成全区多年冻土范围的划分。

通过对前人工作成果的对比分析^[5]发现,南卓铜等^[6-7]的扩展冻结数学模型(E - FROSTNUM)在青藏高原西部地区的多年冻土进行模拟时具有较高的精度。因此,基于前人多年冻土资料,利用 E - FROSTNUM模型,输入 MODIS LST 日均温度,进行参数优选,得到了优化的热物理参数 E (岩土冻融因子);然后将实地调查结果应用于整个工作区,初步划定多年冻土分布范围;最终由冻土地貌专家采用人工交互遥感解译的方式确定了多年冻土界限。其中岩土冻融因子 E 可使用西昆仑野外实地调查区分布图进行参数率定,从而优化模拟结果。将模型输出的冻结数 $F = 0.5$ 作为多年冻土和季节冻土界限, $F < 0.5$ 为季节冻土, $F \geq 0.5$ 为多年冻土。即^[6-7]

$$F = \frac{\sqrt{|DDF|}}{\sqrt{|DDF|} + E \sqrt{|DDT|}} \quad , \quad (1)$$

式中: DDF 和 DDT 分别为冻结和融化指数, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$; E 为无量纲量,表征影响冻土形成、发展以及变化过程,并取决于岩土冻融性质的因子。其中 DDF 和 DDT 由 3 a 的 MODIS LST 日均温度平均给定。

然而对照实际野外调查结果发现,按照上述方法直接计算出的多年冻土面积被高估了,调查区多处湖泊周围的非多年冻土区也被模拟为多

年冻土区。由于多年冻土区与季节冻土区具有不同的分布高程、区域气候、岩土结构和含水量,对外来电磁波有着不同的吸收和反射特性,在遥感影像图中的纹理色调特征也就有所差别。因此,对于以上自动提取的冻土边界,最后需有冻土专家的介入,依据野外调查结果以及高分影像特征,采用人工解译方法进行多年冻土边界的修正和圈定。

藏北高原的气候一般只分为冷季和暖季,多年冻土范围的遥感解译修正主要选用暖季(7—9 月)的高分遥感影像与冷季(12 月—次年 3 月)少雪的高分遥感影像进行对比分析解译。多年冻土和季节冻土的冷季影像特征基本相似,而在暖季则表现出很大差异,因为长期的冻融演化,多年冻土形成了自己独特的地形地貌特征和植被分布规律,而季节性冻土在冷季所产生的冻胀到暖季发生消融恢复,因此暖季时与非冻土区几乎没有什么差别。多年冻土在地貌表现和植被覆盖上的主要解译标志为盐渍化的冻胀丘、冻融泥流阶地、石环(多边形土)和石条、石河和岩屑流等。

以石河和石海为例,主要分布在狮泉河河谷西侧的冲洪积扇上,面积约为数百至数千平方公里不等,由巨大块砾组成,直径 0.8 ~ 1.5 m,稍有磨圆。图 1(左)为狮泉河冲洪积平原上发育的石海,河谷

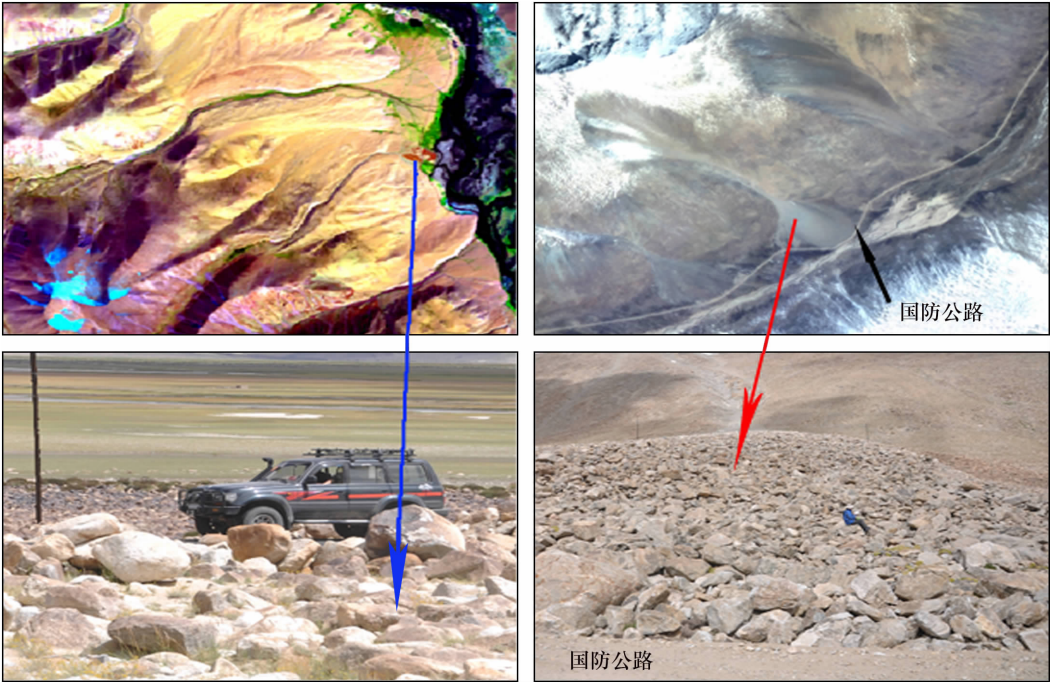


图 1 狮泉河公路附近发育的石海(左)和石河(岩屑坡)(右)

图 1 Rock sea(left) and rock river (debris slope, right) near Shiquanhe River Road

上游有冰川发育,可以判定这些巨大块砾是强烈寒冻风化作用的产物;图 1(右)则是发育在斜坡上的石河(岩屑坡)。

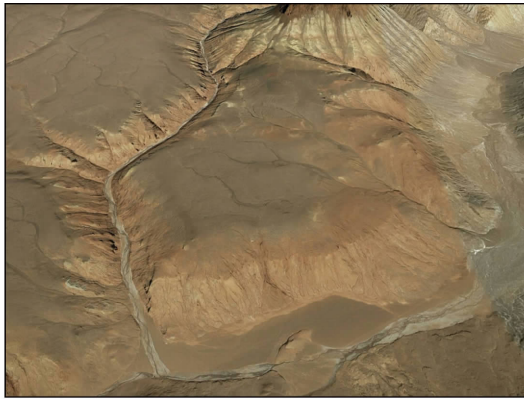
查阅资料发现,石海的分布下限一般比雪线低 200 ~ 400 m,因该地带气温长期处于 0 ℃ 以下的负温条件下^[8],物理风化作用强烈,尤其是冰劈风化作用使岩石破裂变碎,形成大面积分布的块石群,往往在冲洪积扇的扇面上或者台地等开阔平坦地带形成石海。如果块石群分布在山坡上,则会顺着

地势缓慢向下移动,形成石河(岩屑坡),移动期间会略有磨圆。石海和石河(岩屑坡)主要发育在海拔 5 000 m 以上雪线附近的物理风化严重区域,一般位于更新世形成的冰碛上,由于后期冰川、流水和重力等作用,会被搬运至海拔相对较低的平缓地段。

神仙湾地区遥感调查发现有大片冻融泥流阶地(图 2),野外调查证实在天神达坂一带有冻融泥流阶地(图 3)。



(a) GF-1 影像特征



(b) Google Earth 立体影像特征

图 2 天神公路两侧冻融泥流阶地

Fig. 2 Freezing dissolving mud flow terrace on Tianshen Road



图 3 冻融泥流阶地野外实地照片

Fig. 3 Field photos of freezing dissolving mud flow terrace

该地段断裂构造发育,在其西南数千米即是乔尔天山—岔路口断裂带,另外还分布有次级断裂以及 NE 向隐伏断裂。从岩性成分来看,本地的基岩主要由铁隆滩群砂砾岩 ($K_2 t^{ss}$)、龙山组砂岩 ($J_2 l^{ss}$) 以及落石沟组灰岩 ($D_2 l$) 组成。沟谷两侧高山基岩因受区域构造环境的复杂地质内营力作用,外加强烈的寒冻风化剥蚀和冰劈作用,碎屑岩经过漫长的历史演变,逐渐变成了厚层的第四纪松散残积坡,覆盖在了沟谷两侧的坡地上,在高寒高海拔的气候条件下形成了高原永久冻土^[9]。高原暖

季永久冻土就会以冻融泥流的形式,在冰雪融水和洪水综合作用下,随坡面向下蠕滑流动,遇上陡坎低地即堆积形成冻融泥流阶地。冻融泥流阶地的山坡上层以黏土、砂土或含砾砂土等细粒物质为主,山坡的坡度一般比较缓, $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 最为常见。

1.2 完成了阿里西部地区雪被覆盖监测

利用 2013 年 1 月—2014 年 12 月 Landsat ETM 和 OLI 中等分辨率卫星遥感数据,对藏北阿里西部地区近 10 000 km^2 的雪被覆盖情况进行了连续 19 个期次的遥感动态监测。

通过统计计算,总结了 2013—2014 年监测区内雪被覆盖面积的变化特点;结合气温数据,详细分析了雪被覆盖面积变化与气温升降间的对应关系,得出下述结论。

(1)每年雪被覆盖范围最大时间段为 1—2 月;而雪被覆盖范围最小的时间段为 8 月。其中,2013 年雪被覆盖率最大时间发生于 2 月,达到了 80.82%;雪被覆盖率最小时间发生于 8 月,只有 0.77%。而 2014 年,雪被覆盖率最大时间发生于 1 月,达到了 64.69%;雪被覆盖率最小时间也发生于 8 月,只有 1.14%。2013 年雪被最大覆盖率的监测时间为 2 月 14 日,而 2014 年雪被最大覆盖率的监测时间为 1 月 24 日,从监测数据来看,2014 年的雪被最大覆盖发生时间比 2013 年早 21 d。2013 年雪被最小覆盖率的监测时间为 8 月 1 日,而 2014 年雪被最小覆盖率的监测时间为 8 月 20 日,从监测数据来看,2014 年的雪被最小覆盖发生时间比 2013 年晚 19 d。图 4 为 2013—2014 年阿里西部地区雪被覆盖范围变化统计图。

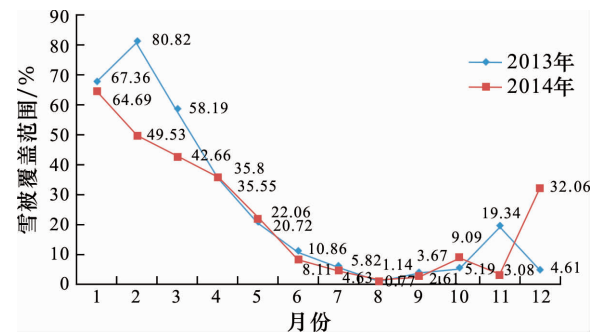


图 4 2013—2014 年阿里西部地区雪被覆盖范围变化统计图

Fig. 4 Dynamic change chart of snow covered area during 2013—2014 in the west of Ngari Region

(2)雪被覆盖面积变化基本按年周期呈波状起伏,面积减少的持续时间较长,是一个相对渐变的过程;而面积增加的持续时间较短,是个相对骤变的过程。2 a 周期内,雪被覆盖范围的减小是个相对缓慢的渐变过程。2013 和 2014 年 1、2 月份的雪被覆盖最大范围(2013 年 2 月份的 80.82% 和 2014 年 1 月份的 64.69%)都一直到 6 月份才缩减到 20% 以下;而雪被覆盖范围的增加是一个相对骤变的过程,从 2013 年的 12 月 15 日 4.61% 的雪被覆盖率增加到 2014 年 1 月 24 日的

64.69% 只用了 40 d 的时间,而 2014 年 11 月 24 日的 3.08% 增加到 12 月 26 日的 32.06%,也只用了 32 d 的时间。

(3)雪被覆盖范围的大小变化与气温的升降变化基本呈负相关。雪被覆盖范围虽然未与气温高低严格对应(即雪盖没有随温度的变高/低而严格地相应变小/大),但从总体趋势上可以看出 2 者的升降趋势有比较好的负相关性(即地表雪盖面积的变化和气温变化基本呈负相关)。

(4)雪被覆盖范围的大小变化与农历节气具有一定的对应关系。最大雪被覆盖范围分布时间基本位于立春前后;而最小雪被覆盖范围分布时间基本位于立秋前后。

1.3 开展班公湖及斯潘古尔湖冷季湖冰覆盖监测

湖冰与积雪类似,不但是一种固态地表水资源,对交通状况也有着重要的影响。班公湖及斯潘古尔湖是著名的大湖,暖季湖的存在使交通必须沿湖绕行;但冷季湖的存在又给当地交通带来了便利,人畜和车辆可直接在湖冰上通行。因此,对边境通道地区湖冰覆盖情况展开遥感动态监测具有实用意义。依托 1999—2013 年的 Landsat ETM 遥感影像,时相选择从当年 11 月份到次年 5 月份,平均每个月份获取 2 期数据,时间间隔在 15 d 左右,开展了冷季 6 个月份的湖冰覆盖情况遥感监测,结果详见图 5。

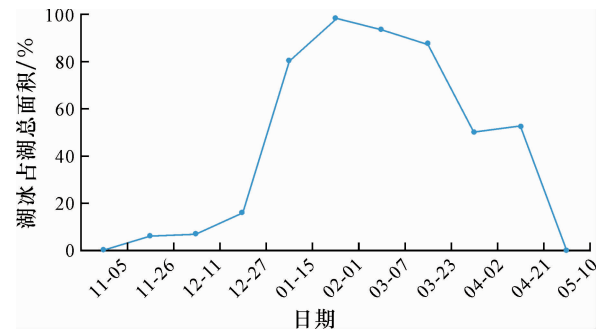


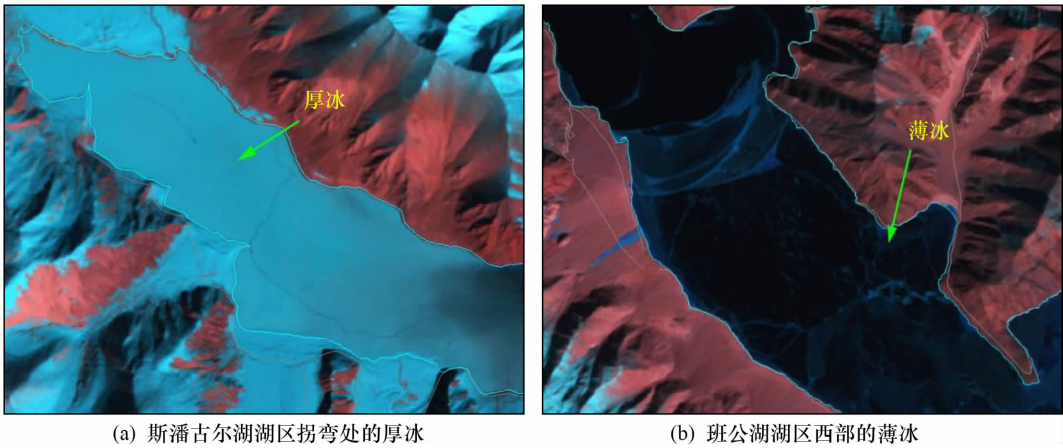
图 5 班公湖及斯潘古尔湖冬季湖冰覆盖率动态变化示意图

Fig. 5 Dynamic change chart of lake - ice cover area of Bangonghu Lake and Sipanguerhu Lake

通过对多期遥感影像分析,发现冷季湖区结冰时间较长,从当年 11 月中旬开始结冰起,一直到次年 5 月份,湖面一直有结冰区域存在,但全湖完全

结冰的时间并不长(仅水域面积较小的斯潘古尔湖结冰封湖的时间比较长)。详细的变化过程为:湖区在11月中旬开始结冰,次年2—3月间结冰面积达到最大(与积雪覆盖成正相关),4月初结冰开始融化,4月底融化速度急剧增长,5月全部融化。从影像的动态分析可以得出,结冰位置变化的总体规

律是从湖边浅水区开始,逐渐向湖心扩展,最终到全湖冻结。更具体地说,湖区拐弯部位冰层存在的时间最长且相对稳定,从影像中蓝色调的深浅变化也可以认定该部位应该是全湖冰层厚度最大的位置(图6(a));湖面结冰时间短的部位则冰层厚度相对较小(图6(b))。



(B7(R) B4(G) B3(B) 假彩色合成影像)
图6 ETM 遥感影像显示的湖冰分布
Fig.6 ETM image of lake – ice one

分析2个湖面结冰规律的可能原因是:虽然班公湖及斯潘古尔湖冷季气温整体较低,但都没有同时开始结冰和融化,除局地气温的差异外^[11],另外一个主要原因可能是2个湖不同区段河流补给水源的丰贫程度不同,造成湖区不同部位湖水的盐度有较大差别,从而导致湖水的冰点出现差异。

2 结论与展望

2.1 结论

(1)在地形地貌、地温分布和坡度坡向特征等综合信息支持下,完成了藏北等地区的多年冻土范围调查。基于前人冻土边界模型得出的多年冻土下限结论,采用DEM数据提取的海拔高程,结合遥感影像反演的地表温度,先进行全区冻土边界的初步划定;然后以地形地貌参数和地物高分遥感影像特征为依据,开展多年冻土边界的解译圈定;最终完成了全区多年冻土范围的划分。

(2)开展了阿里西部地区2 a时长的雪被覆盖遥感监测。在当地气温资料支持下,分析了气温变化与雪被覆盖面积变化之间的对应关系,总结了雪

被覆盖面积的逐月变化规律,为高原西部地区国防建设和交通运输等相关行业提供了基础数据支撑和专业信息服务。

(3)选择班公湖及斯潘古尔湖地区开展了湖冰动态遥感调查,总结了冷季不同月份湖冰的分布范围以及变化规律,为冷季湖冰的通行能力评价提供了基础资料。

2.2 展望

(1)开展以遥感为主要手段、兼顾多种技术方法的永久冻土综合调查。基于冰缘地貌解译开展永久冻土边界划定时,应根据所用遥感影像空间分辨率的高低,确定最合适的永久冻土分布的调查比例尺。采用高分遥感影像(空间分辨率优于2.5 m)提取的永久冻土分布范围可以满足1:5万比例尺的应用需求,而10~15 m中等分辨率遥感影像则适合于1:25万比例尺的永久冻土调查。由于高原上地形地貌的多样性和地质背景的复杂性,不同地区地热参数均不相同,因此会造成永久冻土的冻融指数有较大差异;虽然尽可能通过采用高空间分辨率的遥感数据进行冰缘地貌精细解译,但遥感解译所依据的永久冻土地貌也只是永久冻土存在的

间接标志之一,并不能全面、准确地反映永久冻土的详细分布情况。因此,未来可适当引入其他永久冻土参数进行综合反演,包括电法勘探和探地雷达技术。另外,为了提高永久冻土分布范围的调查精度,需要在调查过程中开展定标和验证,布设一定规模的野外钻孔和坑探工作。

(2)继续加强面向道路通行能力调查的雪被和湖冰覆盖遥感监测。青藏高原上冷季的道路通行能力会受到雪灾的严重影响,尤其对于藏北这个“高原之上的高原”,漫长的冷季降雪会对主要道路带来致命的灾害,例如藏北高原生命线 219 国道冷季经常处于通行受阻状态(尤其在柏油路建成之前,目前还有部分路段因受地质灾害影响仍为土石公路)。未来将会按照国家重点战略需求,结合地方交通运输业以及经济社会发展需要,主要依托国产高分影像和免费的中等分辨率遥感影像,分期分批部署重点地区和关键路段的雪被及湖冰监测,开展国防专题应用和地区交通运输行业相关应用。

致谢: 非常感谢穆真明总工程师在项目开展过程中给予的指导,感谢武平生工程师在野外工作中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 聂洪峰,方洪宾,杨金中,等. 国土遥感综合调查工程总体目标的设计与实现[J]. 中国地质调查,2016,3(5):1-6.
- [2] 燕云鹏,刘刚,穆真明,等. 西北边境地区国土资源遥感综合调查成果报告[R]. 北京,2015.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2013: Synthesis Report. Workign Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5) [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [4] 杨金中,王海庆,陈微. 西昆仑成矿带高分辨率遥感调查主要进展与成果[J]. 中国地质调查,2016,3(5):7-12.
- [5] 刘铁良. 国外计算冻结或融化深度公式概述[J]. 冰川冻土, 1983,5(2):85-95.
- [6] 南卓铜,黄培培,赵林. 青藏高原西部区域多年冻土分布模拟及其下限估算[J]. 地理学报,2013,68(3):318-327.
- [7] 南卓铜,李述训,程国栋,等. 地面冻结数模型及其在青藏高原的应用[J]. 冰川冻土,2012,34(1):89-95.
- [8] 张德锂,李炳元,郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究,2002,21(1):1-8.
- [9] 孙鸿烈. 青藏高原的形成演化[M]. 上海:上海科学技术出版社,1996:20-35.
- [10] 燕云鹏,刘刚,刘建宇,等. 2013—2014 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.
- [11] 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.

Research achievements on cryosphere investigation and monitoring using remote sensing techniques in the Northwest Border Area from 2013 to 2015

YAN Yunpeng¹, LIU Gang¹, LI Yu¹, LIU Jianyu¹,
WANG Yifei², Zhang Bowen², HAN Cong²

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;
2. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: From 2013 to 2015, China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources led the geological survey project “Comprehensive Survey of Land and Resources Using Remote Sensing Technologies in the Northwest Border Area”. As alpine high-altitude and extremely cold area, cryosphere investigation and monitoring using remote sensing techniques in the Northwest Border Area is an important part of the survey works. The research achievements of cryosphere survey are as follows: based on the integrated information such as topography and geomorphology, ground surface temperature, slope and aspect, the permafrost regions have been interpreted in the Northwest Border area; using GF-1 broad width data and Landsat data, remote sensing monitoring about 19 times from Jan, 2013 to Dec, 2014, for the snow cover area, nearly 10 000 km², has been carried out in the west of Ngari Region; lake-ice cover for 6 months in the cold seasons in the Bangonghu Lake and Sipanguerhu Lake area has been monitored using the Landsat image data from 1999 to 2013.

Key words: Northwest Border Area; cryosphere; remote sensing survey; permafrost; snow cover; lake-ice