

doi: 10.6046/gtzyyg.2019.03.26

引用格式: 燕云鹏,徐辉,刘刚,等.2013—2017 年班公湖地区冷季湖泊冰情变化分析——中国西部高寒高海拔地区冰冻圈遥感调查(一)[J]. 国土资源遥感,2019,31(3):209–215. (Yan Y P,Xu H,Liu G,et al. Analyzing the variations of the lake ice phenology in the Pangong Lake area from 2013 to 2017:Remote sensing survey of the cryosphere in the high altitude and alpine region, West China(I) [J]. Remote Sensing for Land and Resources,2019,31(3):209–215.)

2013—2017 年班公湖地区冷季湖泊冰情变化分析

——中国西部高寒高海拔地区冰冻圈遥感调查(一)

燕云鹏¹, 徐 辉², 刘 刚¹, 刘建宇¹

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083; 2. 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029)

摘要: 开展高寒高海拔区域的湖泊冰情变化分析,对于冷季湖冰通行能力评价、暖季冰碛湖溃决防灾减灾以及湖区下游洪涝灾害预测,均具有重要意义。基于 2013—2017 年 Landsat8 陆地成像仪 (operational land imager, OLI) 传感器获得的遥感数据序列,选择了班公湖地区 4 个有代表性的湖泊 (区域),开展了冷季湖泊冰情变化分析,调查结果显示班公湖 Zone1 区和 Zone2 区作为同一个湖泊,冻结开始时间、封冻时间、解冻开始时间和完全解冻开始时间基本一致。尽管斯潘古尔湖和莫里里湖的湖面海拔比班公湖高,但是冻结过程三者基本一致。斯潘古尔湖解冻比班公湖要晚;而最终的完全解冻开始时间两者基本一致。莫里里湖的解冻开始时间比班公湖要晚 0.5~1 个月;而完全解冻时间比别的湖泊约晚 1 个月。

关键词: 中国西部; 高寒高海拔; 冰冻圈; 遥感; 湖泊; 冰情; 班公湖

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2019)03-0209-07



0 引言

研究高寒高海拔地区湖泊冰情变化规律,不仅有利于当地社会经济发展和人民生活,对自然资源的规划开发和管理利用也具有较大影响,尤其是对冰冻期野外通行能力建设 (包括边境地区的国防巡检巡查和当地民众的有效冰面通行) 及解冻期的洪水灾害预测预报等具有重大意义^[1-2]。

作为冰冻圈研究的重要组成部分,湖泊冰情变化监测具有重大的科学研究价值和生产应用借鉴意义。作为气候变化的敏感指示剂,湖冰变化不但能够反映局地气象条件、水文环境以及地理地质条件等小尺度的变化,同时也能够反映全球变暖等大尺度的气候变化^[3]。近几十 a 的研究表明,全球大部分的湖泊冰冻期都在缩短,结冰时间逐渐后延而解冻时间不断提前,引发了跨学科、跨领域的一系列次生问题,包括生态环境变化、气候气象条件变化以及地质灾害等^[4-5]。早在 1995 年,陈贤章等^[6]就利用

NOAA 的 AVHRR 资料,通过 1993—1994 年度的湖冰监测,研究了年内及年际湖冰变化的气候响应。虽然该研究监测周期比较短,且受当时影像空间分辨率限制,但是对本领域类似科研工作的开展却起到了先导作用。作为全球变化监测的热点领域,西北高寒高海拔地区的湖泊冰情变化监测也开展了多项研究。王智颖等^[7]利用 MODIS 数据,采用阈值法提取湖冰物候,分析了 2000—2015 年间青藏高原湖冰物候的时空变化规律及其影响因素;姚晓军等^[8]利用 MODIS 等遥感影像数据和气象资料,综合分析了 2000—2010 年间可可西里地区主要湖泊的冰情变化特征及其影响因素;赵水霞等^[9]利用野外冰情观测及水文气象资料,结合遥感影像,开展了黄河什四份子弯道河冰生消及冰塞过程分析。但是这些监测地区一般都选择在交通相对便利、条件相对较好的青藏高原中东部以及周边地区,而对于青藏高原腹地,如阿里地区的调查却相对较少。本研究区正处在此地理条件艰险、野外工作不易开展的地区,充分发挥遥感的“千里眼”功效,利用多期遥感影像开

收稿日期: 2018-07-06; 修订日期: 2019-01-08

基金项目: 中国地质调查局项目“西北边境地区国土资源遥感综合调查”(编号: 12120113003300)、“西部边境阿克苏—防城港地区综合遥感地质调查与应用项目”(编号: DD20190545)和“全国边防地区基础地质遥感调查”(编号: DD2016007)共同资助。

第一作者: 燕云鹏 (1977-),男,教授级高级工程师,主要从事环境地质遥感调查应用研究。Email: ypyan@sohu.com。

通信作者: 徐 辉 (1977-),女,助理研究员,主要从事短期气候的可预报性研究。Email: xuh@lasg.iap.ac.cn。

展了班公湖地区冷季湖冰监测,以服务于边境地区冷季的国防巡检巡查和当地居民的湖面通行。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

班公湖地区位于阿里高原西北部,北部为东喀喇昆仑山(也称阿里喀喇昆仑山),南部为冈底斯山西段,由于高海拔的地理条件,区内高山林立,冰川相对发育。该地区属于高寒气候区,极端低温可达-33.9℃,区内以大风天气最为显著,11月一次年5月为主要的风季,其中3—5月多大风(经常超过10级),7—8月为雨季,冬春季节降雪相对较少。受班公—东巧—怒江大断裂控制,本区湖泊较多,且大多为构造断陷湖,因此大多湖泊呈长条状,不少湖泊是国界或者区域分界线,位置险要;另外,在高原地区的漫长冷季中结冰后的湖面经常作为重要的通行道路。研究区湖泊分布如图1所示,图中影像采用Landsat8 OLI数据,获取时间为2013年11月21日,经过波段假彩色合成及增强处理。

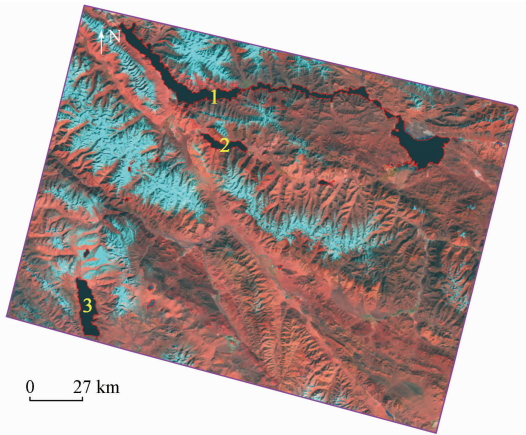


图1 研究区湖泊分布
(Landsat8 OLI B7(R),B5(G),B4(B)假彩色合成)
Fig.1 Lake distribution in the research area

图1中面积大于1.0 km²的湖泊共13个,其

中有3个研究价值较大,自北向南按编号顺序分别为:

1)班公湖(Pangong Lake)又名班公错,或称错木昂拉红波,位于研究区北部,为NW向延展的构造断陷湖。东西长约140 km,南北平均宽约4 km,湖泊向西延伸至克什米尔境内,湖水面积为604 km²,其中在我国境内为413 km²,湖面海拔为4 245 m。

2)斯潘古尔湖(Spanggur Lake),也称为曼冬错,位于班公山西南断陷盆地内,也属典型构造断陷湖。斯潘古尔湖主要靠东南部入湖的唐热曲补给,湖总体呈长条形,长约20 km,宽约3 km,湖水面积为58 km²,湖面海拔为4 296 m。

3)莫里里湖(Moriri Lake),位于拉达克地区,湖面形状近似于平形四边形,长约24 km,宽约6 km,湖水面积为144 km²,湖面海拔为4 527 m。

1.2 数据源概况

当前传感器技术条件下,可用于湖冰监测的遥感数据源可谓琳琅满目。按照传感器的波谱划分,总体可分为可见光、红外和微波3种类型。红外遥感的大气影响较为复杂,且空间分辨率偏低。主动微波数据能穿透云层,昼夜成像,不受天气干扰,但时间周期长;被动微波数据时间序列长,时间分辨率高,不受天气影响,但空间分辨率较低,存在较多混合像元。本研究区内除了班公湖比较大外,大部分湖泊均为中小型湖泊,即使是班公湖本身也是狭长型的湖泊,对于红外和微波遥感数据多个部位的水面宽度甚至没有达到一个像元大小。而可见光—近红外数据,尤其是Landsat8 OLI数据,相对较高的空间分辨非常适合监测中小型湖泊,且其时间分辨率为10~20 d,对于监测本研究区的湖冰变化是一个相对较好的选择。因此本研究基于Landsat8卫星OLI传感器获得的遥感数据序列,开展班公湖地区冷季的湖泊冰情变化监测分析。将影像总体期次划分为13个时间序列,具体划分方案如表1所示,其中“1105”表示时间为11月5日。

表1 Landsat8 遥感影像期次分布
Tab.1 Landsat8 remote sensing image periods (d)

期次	本期次起止时间	本期次时间跨度	与前一期次的间隔	期次	本期次起止时间	本期次时间跨度	与前一期次的间隔
1	1105—1116	12	—	8	次年0302—次年0313	12	16
2	1121—1202	12	16	9	次年0318—次年0321	4	12
3	1207—1218	12	16	10	次年0329—次年0403	6	12
4	1223—次年0103	12	16	11	次年0411—次年0422	12	16
5	次年0111—次年0124	14	20	12	次年0503—次年0516	14	23
6	次年0130—次年0212	14	19	13	次年0519—次年0529	11	14
7	次年0215—次年0225	11	14				

2 湖冰遥感监测技术

2.1 监测对象选择

为了提高研究精度,对于湖冰监测对象进行了若干约束,湖泊必须是常年比较稳定的湖泊,不但湖泊丰水期和枯水期的水面面积大小基本恒定,并且年际变化也相对较小。按此要求对研究区中的 3 个湖泊开展研究,其中班公湖由于面积较大,选择了湖内 2 个代表性区域(班公湖东西部最窄区域各 1 处)进行监测,西部最窄区域命名为 Zone1 区,东部最窄区域命名为 Zone2 区,有关 4 个湖泊(区域)的经纬度坐标、面积和高程等相关信息如表 2 所示。

表 2 监测对象的主要属性

湖泊名称	中心坐标		湖水面积/km ²	湖面高程/m
	经度	纬度		
班公湖 Zone1 区	E79.00°	N33.74°	39	4 245
班公湖 Zone2 区	E79.62°	N33.67°	45	4 245
斯潘古尔湖	E78.90°	N33.50°	58	4 296
莫里里湖	E78.30°	N32.90°	144	4 527

2.2 遥感影像处理及信息提取

采用 2013 年 4 月 1 日—2018 年 1 月 19 日 5 a 间的遥感影像数据,首先进行数据融合及影像增强处理,为了突出冰水颜色对比,根据单波段信息熵和最佳指数分析^[10]结果采用了 B7(R),B5(G),B4(B)假彩色组合方式,将多光谱数据和全色波段数

据进行了波谱融合;然后利用空间分辨率较高的地形数据,通过几何精纠正,完成不同期次影像地物间精确匹配。

利用湖冰和湖水在 OLI 遥感影像上的光谱特征差异,按照湖冰亮度等级,分别开展影像监督分类,采用最大似然法,逐像元对所属类型进行判别^[11],最终完成班公湖地区的各个湖泊(地区)的水面和冰面范围解译,然后对各个时相的湖冰所占面积比重进行统计,分析各湖的物候属性,主要包括冻结开始时间、完全冻结(封冻)时间、解冻开始时间和完全解冻时间,总结研究各个湖泊(区域)的冰情变化规律。其中冻结开始时间定义为湖面出现有 2 处或者 2 处以上结冰区域的时间;解冻开始时间定义为不仅是湖冰开始融化,而且可以明显看到湖冰融化后出露有小块水面的时间。

3 湖冰遥感监测结果

下面仅以班公湖 Zone1 区为例对冷季湖冰监测结果进行详细说明,冷季湖冰年际动态变化如表 3 所示。表中“20131105”表示时间为 2013 年 11 月 5 日;字母 C 代表影像云盖度过大,字母 T 代表由前后 2 个时相推测出的中间的可能时间;斜体表示湖面冻结开始时间,粗体表示湖面封冻开始时间,斜体加下划线表示湖面解冻开始时间,粗体加下划线表示湖面完全解冻开始时间。

表 3 班公湖 Zone1 区冷季湖冰年际动态变化

Tab.3 Interannual dynamic changes of lake ice in cold season for Bangong Lake Zone1 Area							
年度	第 1 期 (1111)	第 2 期 (1127)	第 3 期 (1213)	第 4 期 (1229)	第 5 期 (次年 0118)	第 6 期 (次年 0206)	第 7 期 (次年 0220)
2013—2014 年	<i>20131105</i>	20131121	20131207	20131223	20140124	20140209	<u>20140225</u>
2014—2015 年	<i>20141108C</i>	20141124	20141210	20141226	20150111	20150212	—
2015—2016 年	<i>20151111</i>	—	20151213	20151229	20160114C	20160130C	20160215
2016—2017 年	<i>20161113</i>	20161129	20161215	20161231	20170115T	20170201	<u>20170217</u>
年度	第 8 期 (次年 0308)	第 9 期 (次年 0320)	第 10 期 (次年 0401)	第 11 期 (次年 0417)	第 12 期 (次年 0501)	第 13 期 (次年 0515)	
2013—2014 年	20140313	—	20140329	20140414	—	20140516	
2014—2015 年	—	—	<u>20150401</u>	20150417	20150503	20150519	
2015—2016 年	<u>20160302</u>	20160318	20160403	20160419	20160505	20160521	
2016—2017 年	<u>20170305</u>	20170321	—	20170422	20170508	—	

3.1 2013—2014 年冻结过程

2013 年 11 月 5 日班公湖 Zone1 区北岸沿岸线出现了宽窄不一的薄冰层条带(如图 2(a)),影像色调表现为蓝灰色和灰白色。2013 年 11 月 21 日影像出现 2 个主要变化,一是沿北岸线的薄冰层条带明显变宽,甚至在一些小的湖湾区域出现了整体冻结;二是在南岸区域的部分湖湾内出现了蓝灰色薄冰。到 2013 年 12 月 7 日,影像显示北岸的条带状薄冰进一步变宽,南岸的湖冰也逐渐向北面伸展,

在中部区域南北两岸湖冰连成一体。2013 年 12 月 23 日连片的湖冰进一步冻结延展,同时湖冰颜色也从原来的蓝灰色向白色过渡,说明冰体在不断增厚。2014 年 1 月 24 日影像显示 Zone1 区基本完全冻结(如图 2(b))。总体而言,湖冰的冻结过程是从岸边溪流开始,再到湖岸边缘,最后到湖中心区域;影像色调表现为以白色为主的浅色调区域渐次增多;湖冰形状变化过程是从线形、条带状,逐渐向块状、片状过渡,最终湖区完全冻结。

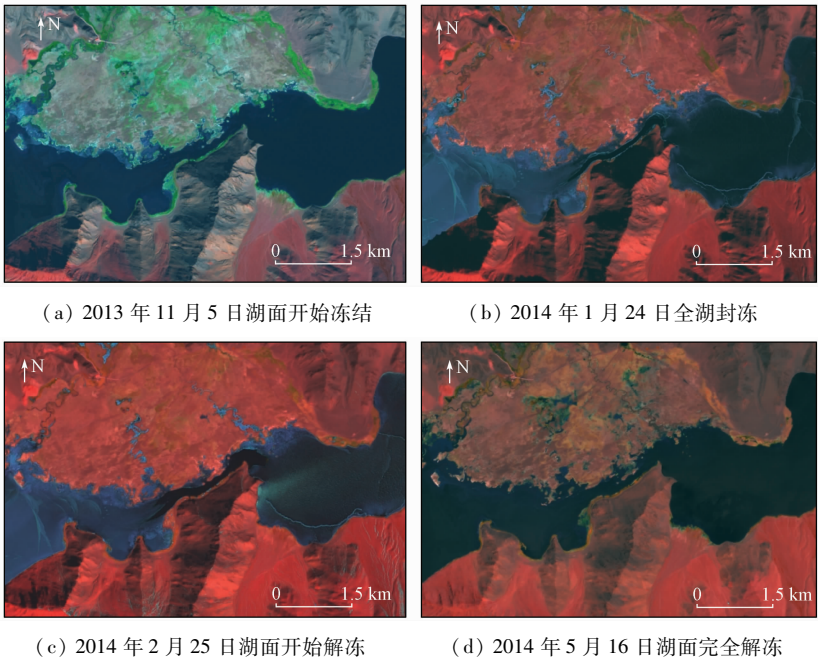


图 2 2013—2014 年班公湖 Zone1 部分区域冷季湖泊冰情变化遥感影像特征

Fig. 2 Remote sensing image characteristics of lake ice dynamic changes in partial areas of Pangong Lake Zone1 in cold season 2013—2014

3.2 2013—2014 年解冻过程

2014 年 2 月 25 日影像显示湖冰颜色变深,表明冰层变薄;少量区域冰体发生融化,表明湖面开始解冻(如图 2(c))。3 月 13 日影像与 2 月 25 日对比变化甚微,表明湖冰解冻进展缓慢;至 3 月 29 日,影像显示湖岸边多个区域露出深色水面,表明此段时间湖冰解冻速度加快;4 月 14 日湖面上冰水面积对比发生明显变化,湖冰解冻面积达到 40%;5 月 16 日班公湖 Zone1 区完全解冻(如图 2(d))。总体而言,解冻过程分为 3 个阶段:①从湖岸边缘以及浅滩开始,湖岸边渐次出现冰雪融水形成的溪流,浅滩处灰白色为主的浅色调冻结区域减少;②湖岸边水深较大的区域灰白色冰体也开始融化,并且融化逐渐加速,湖冰也逐渐变薄;③受气温升高影响,融化速度进一步加快,湖中央的纯白色冰体也开始融化,湖冰解冻面积达到近一半,最后直至全湖完全解冻。

3.3 2014—2017 年冻结—解冻过程

2014—2015 年间,2014 年 11 月 8 日影像无法直接观察湖冰冻结情况(云盖度达到 79.56%),参考其他年份同期冰情,可以推断 2014 年 11 月 8 日湖冰已经冻结;2015 年 1 月 11 日湖面基本封冻;2015 年 4 月 1 日湖冰开始解冻;2015 年 5 月 19 日湖冰完全解冻。

2015—2016 年间,2015 年 11 月 11 日开始冻结;2015 年 12 月 29 日影像显示东半区已经完全冻结,西半区只有少部分区域未冻结;半个月后的 2016 年 1 月 14 日,尽管云量很大,可以推测湖面完

全冻结。2016 年 3 月 2 日湖冰开始解冻,2016 年 5 月 5 日完全解冻。

2016—2017 年间,2016 年 11 月 13 日开始冻结;2016 年 12 月 31 日东半区基本完全冻结,而西半区由于云覆盖无法判断,2016 年 1 月份影像云盖度均比较高,2017 年 2 月 1 日影像显示已经全湖冻结,故推测全湖冻结时间为 2017 年 1 月 15 日;2017 年 2 月 17 日湖冰开始解冻;2017 年 5 月 8 日完全解冻。

4 冰情变化分析

根据前文的监测结果,班公湖地区湖泊(区域)的冷季湖冰变化基本参数如表 4 所示。从表 4 中可以看出班公湖(包括 Zone1 和 Zone2 区域)、斯潘古尔湖的冰冻期大约长 6 个月;而莫里里湖的冰冻期大约长 7 个月。

表 4 班公湖地区湖泊(区域)冷季湖冰变化基本参数				
Tab. 4 Interannual dynamic changes of lake ice in cold season for Pangong Lake area				
湖泊(区域)冰情变化基本参数	班公湖 Zone1 区	班公湖 Zone2 区	斯潘古尔湖	莫里里湖
冻结开始时间(最早)	1105	1105	1105	1105
冻结开始时间(最晚)	1113	1113	1113	1113
冻结开始时间跨度/d	9	9	9	9
封冻开始时间(最早)	次年 0111	1226	1229	次年 0111
封冻开始时间(最晚)	次年 0124	次年 0124	次年 0124	次年 0201

(续表)

湖泊(区域)冰情 变化基本参数	班公湖 Zone1 区	班公湖 Zone2 区	斯潘古 尔湖	莫里 里湖
封冻开始时间跨度/d	14	30	27	22
解冻开始时间(最早)	次年 0217	次年 0215	次年 0318	次年 0422
解冻开始时间(最晚)	次年 0401	次年 0401	次年 0417	次年 0519
解冻开始时间跨度/d	44	46	31	28
完全解冻开始时间 (最早)	次年 0505	次年 0505	次年 0505	次年 0604
完全解冻开始时间 (最晚)	次年 0519	次年 0519	次年 0519	次年 0617
完全解冻开始时间跨 度/d	15	15	15	14
冰冻期时长(最长)/d	196	196	196	225
冰冻期时长(最短)/d	174	174	174	204

4.1 班公湖湖区冰情变化分析

4.1.1 班公湖 Zone1 区湖冰变化规律

从 4 个周期的监测结果来看,班公湖 Zone1 区湖冰冰期内的冻结过程最长(从冻结开始最早时间到完全冻结最晚时间计算)为 81 d;最短(从冻结开始最晚时间到完全冻结最早时间计算)为 60 d。解冻过程最长(从解冻开始最早时间到完全解冻最晚时间)为 92 d;最短(从解冻开始最晚时间到完全解冻最早时间)为 35 d。一个周期内,冻结开始最晚时间到封冻开始最早时间间隔 58 d;封冻开始最晚时间到解冻开始最早时间间隔 23 d,即从影像来看完全封冻时间只有 20 多 d。解冻开始最晚时间与完全解冻开始最早时间间隔近 1 个月。

4.1.2 班公湖 Zone2 区湖冰变化规律

对比班公湖 Zone2 区与 Zone1 区的冰情变化过程,冻结开始时间、封冻时间、解冻开始时间和完全解冻开始时间基本一致,仅在 2014—2015 年间,2014 年 12 月 26 日可能由于气温骤降造成局地突然降雪,引起湖面提前封冻,另外 2015—2016 年间 Zone1 区于 2016 年 3 月 2 日开始解冻,而 Zone2 区是 2016 年 2 月 15 日开始解冻。

尽管 Zone2 和 Zone1 的冻结开始时间基本一致,可是 2 个区的同期冻结百分比却存在差异,Zone2 区小于 Zone1 区,说明 Zone2 应比 Zone1 晚冻结。从 2 个区域湖水盐度差异分析,Zone1 区盐度更大,理论上湖冰冻结应较晚,可事实相反。通过影像特征比对分析,Zone1 区大部分水体颜色浅于 Zone2 区,最可能的原因是二者水深存在比较大的差异,Zone1 区水深较小,而 Zone2 区水深极大,因此才造成西部 Zone1 区域尽管盐度较大,但由于湖水较浅才较早冻结。总之,班公湖东西 2 处作为同

一个湖泊,总体特征和主要指标趋同,但是在若干年份湖区不同部位的具体冻结解冻过程却存在差异。

4.1.3 班公湖湖面封冻过程与气温变化对比分析

利用距班公湖湖区最近的狮泉河气象数据,通过统计 2013—2017 年各年度 11 月—次年 3 月的逐月气温平均值,发现每年 1 月份的气温,无论是最高气温还是最低气温,都是全年的最低值。每年 1 月的气温资料极低值表现与同期的全湖封冻时间具有良好的对应关系。

另外,还利用气象资料分析了封冻前一个月内的气温变化。以 2015—2016 年为例,湖冰完全封冻时期为 2016 年 1 月 14 日。通过比对封冻前一个月内的气温变化,可以看出封冻过程的 32 d 中,后 16 d 平均最高气温比前 16 d 下降了 1.06 ℃;而平均最低气温更是降低了 2.69 ℃。以上数据表明,湖面封冻前无论是最高气温还是最低气温均会有一个明显的降低过程;而封冻期结束后 1 个月内气温一般就会有所回升。

4.2 斯潘古尔湖冰情变化分析

2013—2016 年间 4 个周期的湖冰监测结果表明,斯潘古尔湖的冻结开始时间与班公湖基本一致,而影像显示斯潘古尔湖同期的冻结百分比均大于班公湖,说明斯潘古尔湖要稍早冻结。2 个湖的全湖封冻时间基本一致,仅在 2015—2016 年间,可能由于局地降温导致 2015 年 12 月 29 日斯潘古尔湖全湖提前封冻。对于解冻开始时间,斯潘古尔湖均比班公湖要晚 0.5 ~ 1 个月;而 2 个湖的湖冰完全解冻时间基本一致。

4.3 莫里里湖冰情变化分析

莫里里湖的冻结开始时间与班公湖基本一致,而同期冻结百分比与班公湖 Zone2 区相似,比 Zone1 区略小,说明莫里里湖与 Zone2 区的冻结进程一致,比 Zone1 区稍晚。莫里里湖的全湖封冻时间与班公湖基本相同,仅 2017 年的全湖封冻时间晚了近半个月,可能是局地小气候作用所致。莫里里湖的冻结前半程非常缓慢,从开始冻结到冻结过半用时近 2 个月;而后半程冻结速度加快,仅用时 2 周。因此 Landsat8 OLI 传感器很少有机会能够捕捉到湖区大半冻结的状态。可能受海拔高度影响(高于班公湖近 300 m),莫里里湖的解冻开始时间非常晚,比班公湖解冻开始时间大约要晚 2 ~ 3 个月,一般是在每年 4—5 月间,前后间隔约 1 个月的时长。4 个周期的湖冰监测数据显示,莫里里湖的完全解冻时间均在 6 月中上旬,比其他湖区完全解冻时间大约要晚 1 个月。

5 结论与讨论

5.1 结论

1)班公湖 Zone1 和 Zone2 作为同一个湖泊,冻结和解冻过程的总体特征和主要参数都具有同一性,说明二者的冻结过程和解冻过程基本同步。具体而言,每年 11 月份开始冻结,到次年 1 月中下旬开始封冻。解冻开始时间跨度较长,前后约 44 d,而完全解冻开始时间集中在 5 月中上旬。2 个区域冻结过程比较而言,西部 Zone1 区域的冻结过程稍早。东西部遥感影像特征分析表明,可能是 2 个区域水深存在较大差异,西部区域水深较小而东部较大,造成虽然西部 Zone1 区域湖水盐度较大但湖区仍较早冻结。

2)尽管斯潘古尔湖和莫里里湖的湖面海拔比班公湖都要高,但是三者的冻结过程,无论是冻结开始时间还是封冻开始时间,三者都基本相同,仅莫里里湖的封冻开始时间在某些年份略晚。斯潘古尔湖和莫里里湖的解冻开始时间都比班公湖要晚。其中,斯潘古尔湖解冻时间比班公湖要晚 0.5 ~ 1 个月;而最终的完全解冻开始时间基本一致。而莫里里湖的解冻开始时间非常晚,比班公湖大约要晚 2 ~ 3 个月。完全解冻时间在 6 月中上旬,比其他湖区约晚 1 个月。

5.2 应用讨论

作为自然资源国情调查的重要组成部分,班公湖地区冷季湖泊冰情变化调查分析不仅填补了青藏高原西部艰险地区湖冰逐年持续遥感监测的空白,而且对于边境地区的国防建设和当地经济社会发展以及人民生活(比如冰面沉排建筑工程)都具有深远影响。有关本项研究的直接应用:班公湖地区湖冰开始冻结到完全封冻时长一般为 2 个月,此时利用湖冰通行具有一定危险性。完全封冻到开始解冻,一般会有 2 个月时间,可以利用湖冰进行有效通行。湖面开始解冻到完全解冻一般为 1 ~ 2 个月,分为 2 个阶段,第一阶段湖冰解冻速度缓慢,根据湖面解冻情况尚可谨慎通行;第二阶段冰融速度加快,需要密切关注湖冰融化进展情况。湖面完全解冻后,如果湖区再次出现结冰现象,此时的冰体属于零时性的薄片状湖冰,应严禁在湖面通行。

参考文献 (References):

[1] 杨 倩,吕德昊. 湖冰物候变化遥感监测研究进展[J]. 科技风, 2017(17):116 - 117.

Yang Q, Lyu D H. Progress in remote sensing monitoring of lake ice phenology[J]. Technology Wind, 2017(17):116 - 117.

[2] 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)主要进展[J]. 中国地质调查,2017,4(3):51 - 56.

Yan Y P, Liu G, Li Y, et al. Research achievements on cryosphere investigation and monitoring using remote sensing techniques in the northwest border area from 2013 to 2015[J]. Geological Survey of China, 2017, 4(3):51 - 56.

[3] 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. Remote Sensing of Cryosphere [M]. Beijing: Science Press, 2006.

[4] 辛羽飞,卞林根. 全球冰冻圈变化预测研究现状[J]. 极地研究, 2008, 20(3):275 - 286.

Xin Y F, Bian L G. Progress of prediction of the global cryosphere change[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2008, 20(3):275 - 286.

[5] 魏秋芳,叶庆华. 湖冰遥感监测方法综述[J]. 地理科学进展, 2010, 29(7):803 - 810.

Wei Q F, Ye Q H. Review of lake ice monitoring by remote sensing [J]. Progress in Geogrophy, 2010, 29(7):803 - 810.

[6] 陈贤章,王光宇,李文君,等. 青藏高原湖冰及其遥感监测[J]. 冰川冻土,1995,17(3):241 - 246.

Chen X Z, Wang G Y, Li W J, et al. Lake ice and its remote sensing monitoring in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(3):241 - 246.

[7] 王智颖,吴艳红,常 军,等. 青藏高原湖冰物候的时空变化及其影响因素[J]. 北京工业大学学报,2017,43(5):701 - 709.

Wang Z Y, Wu Y H, Chang J, et al. Temporal and spatial variation of lake ice phenology and its influencing factor in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(5):701 - 709.

[8] 姚晓军,李 龙,赵 军,等. 近 10 年来可可西里地区主要湖泊冰情时空变化[J]. 地理学报,2015,70(7):1114 - 1124.

Yao X J, Li L, Zhao J, et al. Spatial - temporal variations of lake ice in the Hoh Xil region from 2000 to 2011[J]. Acta Geographic Sinica, 2015, 70(7):1114 - 1124.

[9] 赵水霞,李畅游,李 超,等. 黄河什四份子弯道河冰生消及冰塞过程分析[J]. 水利学报,2017,48(3):351 - 358.

Zhao S X, Li C Y, Li C, et al. Processes of river ice and ice - jam formation in Shensifenzi bend of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(3):351 - 358.

[10] 李 超,李畅游,赵水霞,等. 基于遥感数据的河冰过程解译及分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(3):52 - 56.

Li C, Li C Y, Zhao S X, et al. Interpretation and analysis of river ice process based on remote sensing data[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(3):52 - 56.

[11] 李均力,盛永伟,骆剑承. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取[J]. 遥感学报,2011,15(1):29 - 43.

Li J L, Sheng Y W, Luo J C, et al. Automatic extraction of Himalayan glacial lakes with remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(1):29 - 43.

Analysis of the variations of the lake ice phenology in the Pangong Lake area from 2013 to 2017: Remote sensing survey of the cryosphere in the high altitude and alpine region, West China(I)

YAN Yunpeng¹, XU Hui², LIU Gang¹, LIU Jianyu¹

(1. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China*; 2. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: The analysis of the lake ice phenology in the high altitude and alpine area is of great significance for traffic capacity assessment on the lake ice in the cold season, disaster prevention and reduction of moraine lake burst and prediction on the flood disaster of the lower reaches in the warm season. On the basis of the OLI data from 2013 to 2017, four typical lakes(areas) in the Pangong Lake area were chosen for the analysis of the lake ice phenology in winter. The results show that the starting freeze time, the time of maximum ice amount, starting thaw time and totally thaw time of Zone1 and Zone2 in the Pangong Lake were almost simultaneous. Although Spanggur Lake and Moriri Lake both have higher altitude than Pangong Lake, and they shared the similar freeze processes. The starting thaw time of Spanggur Lake was later than Pangong Lake, while the totally thaw time was almost the same. The starting thaw time of Moriri Lake was about half to one month later than that of Pangong Lake, and the totally thaw time was one month later than other three lakes.

Keywords: West China; high altitude and alpine region; cryosphere; remote sensing; lake; ice phenology; Pangong Lake

(责任编辑: 陈 理)