

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0006

DU Yu'e, LIU Baokang, HE Weiguo, et al. Dynamic change and cause analysis of Salt Lake area in Hoh Xil on Qinghai-Tibet Plateau during 1976-2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 47-54. [杜玉娥, 刘宝康, 贺卫国, 等. 1976-2017年青藏高原可可西里盐湖面积动态变化及成因分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 47-54.]

1976-2017年青藏高原可可西里盐湖面积动态变化及成因分析

杜玉娥^{1,2}, 刘宝康^{3,4}, 贺卫国⁵, 段水强⁶, 侯扶江¹, 王宗礼¹

(1. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃兰州 730020; 2. 甘肃省科学院自然能源研究所, 甘肃兰州 730020; 3. 青海省气象科学研究所, 青海西宁 810001; 4. 青海省防灾减灾重点实验室, 青海西宁 810001; 5. 广东财经大学信息学院, 广东广州 510320; 6. 青海省水文水资源勘察局, 青海西宁 810001)

摘要: 青藏高原湖泊是全球气候变化的敏感指示器。近56年来, 可可西里地区气候呈显著暖湿化趋势, 其中气温上升速率为 $0.33^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($R=0.746, P<0.01$), 降水增加速率为 $23.4\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($R=0.422, P<0.01$)。近40年来, 盐湖面积总体呈增大趋势, 其中, 1976-2011年溃堤前盐湖面积以 $1.63\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率扩大, 溃堤后以 $8.51\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率持续扩大。总体来看, 近40多年来, 盐湖面积先后经历了缓慢增大(1976-2011年)→急剧增大(2012-2013年)→稳定增大(2014-2017年)三个阶段。盐湖面积前期缓慢扩大的主要原因是可可西里地区气候暖湿化的结果, 而后期面积急剧扩大的主要原因是因为2011年9月15日盐湖上游的卓乃湖溃堤, 导致下游的3个湖泊(库赛湖、海丁诺尔湖和盐湖)串连成一体; 冰川和冻土融水可能是引起可可西里盐湖面积扩张的原因, 但并非主要原因。后期盐湖面积还将呈稳定增大趋势。盐湖面积扩大导致盐湖湖水淡化, 周边草地受到淹没破坏的面积不断扩大, 这种变化不仅对其周边草地生态环境产生破坏, 还可能对可可西里周边重大工程设施产生不利影响。鉴于盐湖面积今后还将持续增大, 并对其周边重大工程设施产生不利影响。因此, 应用多源卫星资料对盐湖进行长期持续的跟踪观测仍将是相关政府部门关注的重点。

关键词: 青藏高原; 可可西里; 盐湖面积; 卓乃湖溃堤; 成因分析

中图分类号: P343.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)01-0047-08

0 引言

青藏高原是全球气候变化的敏感区和生态系统的脆弱区, 同时也对全球气候变化产生强烈的反馈。地处青藏高原腹地的可可西里地区, 是我国湖泊分布最为密集的地区之一, 也是全球盐湖最集中的地区, 目前在可可西里1平方公里以上的盐湖就多达359个, 多分布于可可西里西部和北部。由于地理位置偏远, 加之海拔高、空气稀薄, 受人类活动的影响很少, 因此该地区湖泊的萎缩或扩张能够真实地反映区域气候与环境的变化状况, 是全球气候变化的敏感指示器^[1-3]。

2011年9月中旬, 位于可可西里腹地的卓乃湖东部发生大决堤, 引发洪水灾害, 大量湖水外泄, 导致卓乃湖面积急剧减小, 外流湖水向东先后流经下游的库赛湖和海丁诺尔湖, 最后注入盐湖, 导致4个湖泊串连成一体, 盐湖面积显著增大。

盐湖所在的可可西里地区, 人烟稀少、自然条件恶劣, 平均海拔超过4400m, 难以通过常规观测手段有效地获取湖泊动态变化数据。卫星遥感技术的快速发展及卫星数据的多源化, 不仅节省了大量人力和物力, 而且可以及时监测湖泊动态变化, 从而为青藏高原湖泊水患监测提供了新的手段^[4-5]。

收稿日期: 2017-09-18; 修订日期: 2017-11-19

基金项目: 甘肃省科学院自然能源所应用与开发项目“柴达木盆地植被变化特征及其对气候变化的响应研究”(D0281)资助

作者简介: 杜玉娥(1974-), 甘肃灵台人, 工程师, 1999年毕业于兰州理工大学, 现为兰州大学在读博士研究生, 从事湖泊、草地遥感和能源估算研究。E-mail: duyel2@lzu.edu.cn

通信作者: 王宗礼, E-mail: wangzongli@sina.com.

近年来,国内外许多学者利用不同卫星影像资料对青藏高原湖泊动态变化进行了分析。Baban^[6]采用 Landsat TM 遥感数据进行湖泊水体、湖域生态信息的提取与分类;Birket^[7]综合利用 1992 年至 1998 年多时相雷达以及 NOAA/AVHRR 遥感资料,分析预测了非洲乍得湖的年际和季节际水面变化及该流域的洪水变化规律;鲁安新等^[8]利用 1970 - 2000 年以来的地形图、航空相片和多时相 TM 卫星遥感资料,建立湖泊变化遥感综合分析方法,并对青藏高原南部的羊卓雍湖和沉错等湖泊的变化进行了分析;李均力等^[9]利用 Landsat 长时间序列遥感数据,制作青藏高原 1970s、1990s、2000s 和 2009s 四个时段的湖泊分布图及湖泊变化图,分析了三十多年来内陆封闭流域内湖泊变化的时空特征;韩芳等^[10]利用极轨气象卫星 NOAA/AVHRR 遥感监测资料分析了达里诺尔湖水体的年际变化;马明国等^[11]应用 1973 - 2006 年 Landsat MSS、TM、ETM+ 以及中巴卫星等高分辨率的遥感数据和 250 m 分辨率的 MODIS 数据监测湖泊群动态变化特征;邵兆刚等^[12]利用 MSS 和 ETM 资料,对近 25 年来青藏高原重点湖泊的变迁进行了分析;张继承等^[13]利用 1:10 万地形图、MSS 遥感图像、TM、ETM 数据,分析了西藏地区湖泊分布及 30 年来湖泊变迁的时空差异特征;边多等^[14]利用地形图、TM 和 CBERS 等卫星遥感资料和气候资料分析了西藏那区地区东南部的巴木错、蓬错、东错、乃日平错等 4 个湖泊水位面积近 30 年来的变化特征及气候成因;段水强等^[15]利用 MSS、TM 和 ETM 卫星资料分析了青海羌塘盆地面积大于 1 km² 以上的 67 个湖泊在 1976 - 2010 年期间的变化特征;Zhang 等^[16]利用 ICESat 和 Landsat 数据对中国最大的 10 个湖泊 2003 - 2009 年的高程、面积和体积变化进行了研究。上述研究利用 MSS、TM、ETM 等国外卫星资料对青藏高原面积或水位变化进行了分析研究,但国外数据存在过境周期较长,幅宽较小,加之受云等因素的影响,不仅难以反映湖泊面积或水位的月际及季节变化,而且通常难以精确反映短期内湖泊、水库的水患发生发展过程及其对周边环境的影响。而高分一号卫星和环境减灾卫星的 CCD 资料同国外同等分辨率的卫星资料相比,幅宽更宽,过境周期更短,晴空数据更多^[4]。因此,结合历史时期的 Landsat MSS、TM/ETM+/OLI 和气象等数据,应用高分一号卫星、环境减灾卫星等多源卫星资料分析了盐湖面积长期变化及其

上游卓乃湖溃堤后盐湖面积的剧变过程及成因,并对其面积快速扩大对周边环境产生的影响及对策进行了论述,旨在为政府部门对可可西里地区生态环境安全及重大工程设施的安全评价与决策提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

盐湖,又名 68 道班盐湖,以产盐而得名。其中心点位于(35°32' N, 93°25' E)处,在可可西里国家级自然保护区东北部,青海省玉树藏族自治州治多县西部(图 1)、昆仑山脉南侧,属可可西里腹地,距索南达杰保护站约 12 km,海拔在 4 400 m 以上,盐湖西北部自西向东依次分布有卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔湖,这 4 个湖泊均为内流湖,其中卓乃湖和库赛湖为盐水湖,而海丁诺尔湖和盐湖则为高浓度盐分的咸水湖。属硫酸镁亚型盐湖,局部属硫酸钠亚型和碳酸盐型卤水,盐类矿物沉积物主要以食盐 + 芒硝 + 石膏为特征。

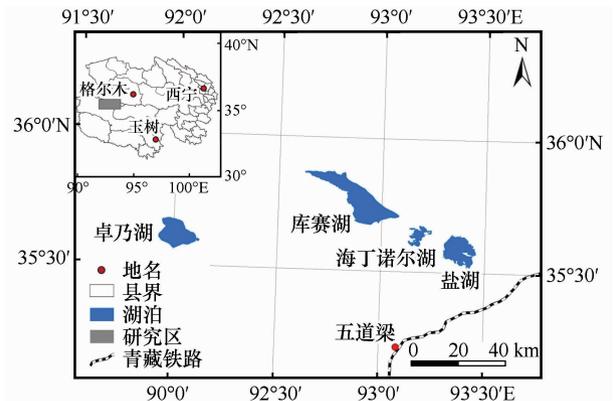


图 1 可可西里盐湖地理位置

Fig. 1 Map showing the location of Salt Lake in Hoh Xil region

1.2 数据来源

表 1 为环境减灾卫星、高分一号可见光 (CCD) 数据与国外高分数据参数对比情况。本项研究所用环境减灾卫星数据和高分一号数据来自中国资源卫星应用中心陆地观测卫星数据服务平台 (<http://218.247.138.121/DSSPlatform/index.html>)。选取可可西里地区盐湖及其上游的卓乃湖、库赛湖所在区域的 CCD 数据(表 2)。2009 年之前卓乃湖、库赛湖及盐湖面积数据来自历史文献和青海省水文水资源勘察局。五道梁气象站的气温、降水数据来自青海省气象局。1:25 万 DEM 数据来自 SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org> CGIAR-CSI)。

表 1 环境减灾卫星、高分一号可见光 (CCD) 数据与国外高分数据参数对比
Table 1 Parameter comparison on environmental disaster reduction satellite, high score one visible light (CCD) data and foreign high score data

波段号	光谱范围/ μm	通道数	全色/多光谱/m	幅宽/km	过境周期/天
HJ1 A/B	0.43 ~ 0.90	4	30	360/720	2
GF-1	0.45 ~ 0.89	4	2/8、16	400/800	4
Landsat	0.45 ~ 2.35	7	30	185	16
SPOT	0.50 ~ 0.89	4	2.5/5.0	60	26
ALOS	0.42 ~ 0.89	4	2.5/10	70	46

表 2 所用卫星数据
Table 2 The satellite data

数据	过境时间/yyyy - mm - dd	分辨率	数据来源
Landsat TM/ETM +	1976-11-30, 1994-10-24, 2002-05-15, 2006-09-07	28.5 m	USGS/NASA
HJ1A/B CCD	2009-08-30, 2010-09-06, 2011-07-15, 2011-08-22, 2011-09-14, 2011-09-18, 2011-10-12, 2012-08-19, 2013-08-01, 2014-07-22, 2015-09-30	30 m	中国资源卫星应用中心
GF-1 CCD	2016-09-26, 2016-10-02, 2017-05-24	16 m	

1.3 方法

在 ENVI 5.3 下加载影像数据, 首先根据不同地物在环境减灾卫星和高分一号卫星 CCD 数据各波段的光谱特性, 分别赋予通道 4、3、2 为红、绿、蓝 3 种颜色进行假彩色合成, 定性观测水体边界位置。其次, 依次进行辐射校正、Flaash 大气校正和正射校正, 利用已校正的 LANDSAT TM 影像, 对假彩色合成图像进行几何精校正, 校正后的均方根误差 (RMSE) 均小于 0.5 个像元。最后, 采用多波段经验阈值模型提取湖泊水体面积, 算法为 $B4/B2 < R1$ 且 $B4 < R2$

< 1 且 $B4 < 0.05$, 其中 $B2$ 、 $B4$ 表示环境减灾卫星或高分一号 CCD 资料的第二和第四通道的反射率 (图 2)。

2 结果分析

2.1 近 40 年盐湖水体面积变化趋势

1976 - 2017 年期间盐湖面积总体上呈现增大趋势, 其中 2011 年溃堤前的湖泊面积较 1976 年增大了 7.50 km^2 , 扩大部分的面积占盐湖总面积 19.5%, 年平均增速为 $1.63 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 面积扩大不明显 (图 3)。2011 年 9 月 14 日上游卓乃湖发生溃堤后, 2011 年 10 月 12 日盐湖面积为 46.84 km^2 , 较卓乃湖溃堤前的 8 月 22 日仅增大了 0.94 km^2 , 表明 2011 年盐湖面积未发现明显变化。然而 2012 年 5 月 29 日盐湖面积显著增大, 较 2011 年 10 月 12 日增大 1.13 倍, 此后的 2012 年 8 月 19 日和 9 月 13 日, 盐湖均呈持续快速增大趋势, 表明盐湖上游的卓乃湖溃堤已导致下游的库赛湖和海丁诺尔湖相继发生湖水外溢, 最后注入盐湖, 使得盐湖面积持续扩大, 2013 年 6 月 11 日, 盐湖面积已增大为 137.96 km^2 , 2014 年 7 月 24 日盐湖增幅开始减缓, 较 2013 年 6 月 11 日相比扩大了 6.54 km^2 , 至 2017 年 10 月 10 日面积已达 161.44 km^2 , 但增幅进一步减缓 (图 3a、3b)。另外, 分析还表明, 2012 年后盐湖面积呈持续扩大趋势, 增加速率为 $8.51 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$, 但 2014 年后增速明显放缓, 仅为 $5.24 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

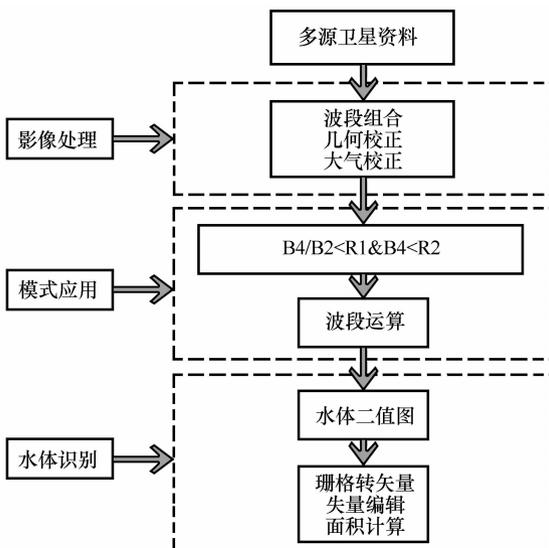


图 2 环境减灾卫星或高分一号卫星数据处理流程
Fig. 2 The processing of Environmental disaster reduction satellite or high score satellite data

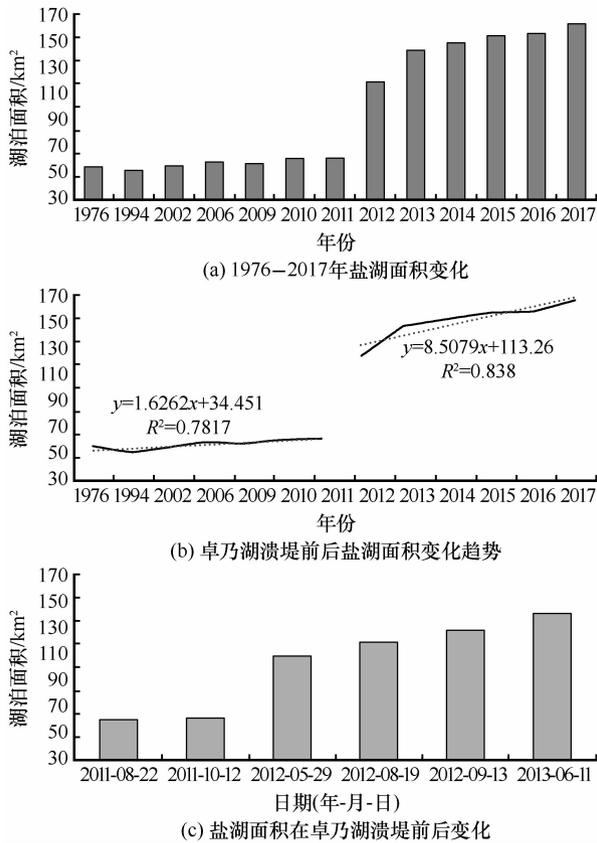


图3 近40年来盐湖水体面积变化及上游卓乃湖溃堤(2011年)前后其面积变化

Fig. 3 The change of the salt lake area in the past 40 years and the change of its area before and after the outburst of Zonag Lake (2011)

总体来看,近40多年来,盐湖面积先后经历了缓慢增大(1976–2011年)→急剧增大(2012–2013年)→稳定增大(2014–2017年)三个阶段。

2.2 卓乃湖决堤前后盐湖湖岸线变化

通过对卓乃湖溃堤以来2011年10月12日至2015年9月30日提取的盐湖边界进行叠加,结果显示,2015年9月30日盐湖湖岸线与2011年10月12日相比,在东南部和西南部湖岸线扩张显著(图4)。其中,东南部向外扩张最为显著,最大扩张距离为8 km,西南南部最大扩张距离为5.2 km,东北方向扩张不及东南部和西南部,但最大扩张距离仍有2.8 km。另外,盐湖在2011年没有明显扩大,而是从2012年开始有了显著的扩张。随后由于上游的卓乃湖溃堤、库赛湖及海丁诺尔湖相继出现外溢后,面积逐渐趋于稳定,从而导致盐湖面积进入稳定扩张期,与姚晓军等^[17]得到的结论一致。

2.3 盐湖面积巨变成因分析

2.3.1 气候变化

1961–2016年期间可可西里年平均气温呈增

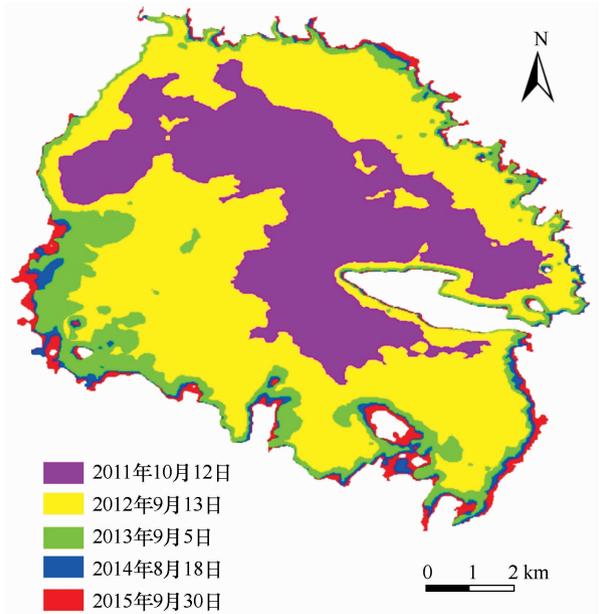


图4 2011–2015年盐湖湖岸线变化遥感监测

Fig. 4 The change of Salt Lake shoreline monitoring by remote sensing during 2011–2012

加趋势,其中2000年前后的增加速率分别为 $0.20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.51\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,尤其是2000年以来增温速率显著,年平均气温为 $-4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,较历年(1981–2010年)平均气温偏高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1961–2016年,可可西里年平均降水量为 301.5 mm ,近56年来呈不断增加趋势,其中2000年前后的增加速率分别为 $9.8\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $23.4\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$,2000年以后增加速率为以前增加速率的2.4倍,年平均降水量为 335 mm ,较历年(1981–2010年)平均偏多11%。

综合分析表明,近56年来,可可西里地区气候呈现暖湿化趋势,其中2000年以来的气温、降水增加尤为明显(图5),与施雅风等^[18]得到的结论一致。

2.3.2 冰川及冻土融水

除气候变化因素对盐湖面积的影响外,盐湖北部的冰川融水和及其周边冻土中的水分释放也是其补给的形式。根据中国冰川目录^[19]和最新一期冰川目录资料^[20]可知,20世纪70年代初期,可可西里冰川面积为 $2\,423.60\text{ km}^2$,21世纪初为 $2\,243.35\text{ km}^2$,共减少 180.25 km^2 ,表明可可西里地区冰川整体呈退缩状态。然而,根据段水强等^[16]、姚晓军等^[17]的研究成果,可可西里冰川融水对湖泊面积变化影响较小;据伍道梁地区冻土资料分析,1980年代以来,伍道梁冻土层厚度变薄,活动层厚度增加,冻结持续日数缩短,但冻土层中地下冰融化很

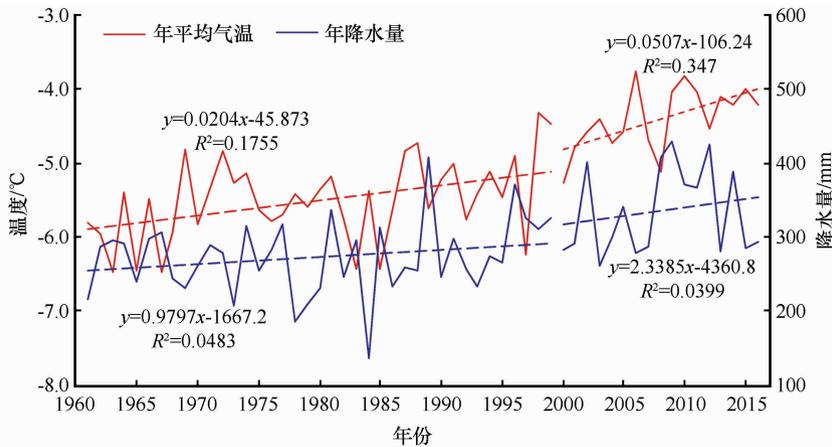


图 5 1961 - 2016 年可可西里地区气候变化

Fig. 5 Climatic change in Hoh Xil region during 1961 - 2016

难转入流动的地下水, 并且比例很小^[21]。因此, 冰川和冻土融水可能是引起可可西里盐湖面积扩大的部分原因, 但并非主要原因。

3.3.3 上游卓乃湖溃堤

2011 年 9 月中旬, 卓乃湖发生溃堤, 面积急剧减小, 从溃堤前的 274.08 km² 减小到溃堤后的 160.16 km², 减幅为 113.92 km²。2012 - 2017 年期间, 面积减小了 13.90 km², 随着决口处继续下切拉深, 卓乃湖储水功能进一步减小, 2013 年后面积逐渐趋于稳定, 下泄的湖水先后进入库赛湖、海丁诺尔湖和盐湖。

库赛湖和海丁诺尔湖水体在 2011 年卓乃湖溃堤后均先快速增大, 后减小, 2013 年后趋于稳定。2011 年 8 月 22 日库赛湖面积为 288.43 km², 至 2011 年 10 月 12 日扩大为 345.49 km², 至 2012 年 8 月 19 日面积减小为 340.49 km², 表明 2011 年 10 月至 2012 年 8 月期间, 库赛湖发生湖水外溢导致面积减小。

海丁诺尔湖在卓乃湖溃堤前 2011 年 8 月 22 日面积为 51.4 km², 至 2011 年 10 月 12 日, 面积扩大为 67.2 km², 2012 年 8 月 19 日面积进一步扩大为 79.3 km², 2013 年 6 月 11 日略有增大, 为 79.7 km², 2014 年 10 月 20 日面积减小为 72.4 km², 表明 2013 年 6 月至 2014 年 10 月期间, 海丁诺尔湖发生湖水外溢导致面积减小。

盐湖溃堤前 2011 年 8 月 22 日面积为 45.90 km², 卓乃湖溃堤至 2011 年 10 月 12 日, 盐湖面积扩大为 46.84 km², 2012 年 8 月 19 日面积扩大为 111.20 km², 2013 年 6 月 11 日面积为 137.96 km², 2017 年 10 月 10 日面积为 161.44 km², 表明盐湖上

游的卓乃湖溃堤导致库赛湖和海丁诺尔湖相继发生湖水外溢, 并最终导致盐湖面积剧烈变化(图 6)。

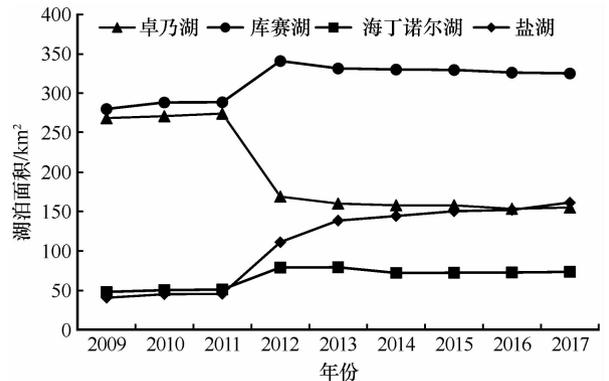


图 6 2009 - 2017 年卓乃湖溃堤及其对下游湖泊的影响

Fig. 6 Zonag Lake dike and its impact on downstream lakes during 2009 - 2017

2.4 盐湖面积增大产生的影响

2.4.1 对周边草地的影响

盐湖水体面积在 2009 - 2017 年间一直处于增长状态, 从 2009 年的 40.9 km² 扩大到 2011 年 10 月的 46.8 km², 3 年间面积增加约 6 km², 增加幅度较小。2011 年 10 月后, 盐湖面积显著增大, 从 46.8 km² 快速扩大至 100 km² (2012 年 5 月未完全解冻前), 湖体完全解冻后, 水体面积进一步增大, 至 2012 年 9 月达到 122 km²。2013 年 6 月最新监测资料显示, 盐湖水体面积已达到 138 km²。经过对比分析 2011 年 10 - 11 月的遥感图像, 盐湖水体面积显著增大发生在 11 月初。由此推测, 卓乃湖溃堤后外泄的水流, 经过库赛湖、海丁诺尔湖蓄集、分流, 最终大部分注入盐湖, 使盐湖及周围小湖泊融为一体, 并向东、向南蔓延。

2.4.2 对周边生态环境及重大工程设施的影响

盐湖周边分布有石油管线、通讯光缆、青藏铁路和青藏公路等重大工程设施。另外,盐湖湖水为高浓度咸水湖,其面积扩大会淹没和破坏周边草地植被,而且对附近的输油管线等工程设施产生腐蚀破坏,严重威胁青藏铁路和青藏公路的运行安全。2011年9月下旬以来,盐湖湖岸线向东南方向推进了4 km,距离青藏铁路和青藏公路约8 km,并且还有继续逼近的趋势^[22]。根据茆亚平等^[23]利用可可西里地区高程数据模拟的结果,如果盐湖所在流域的降水在未来几十年里呈持续增加态势,盐湖则必然继续扩张,并将朝着湖水外溢方向演化,且外溢所需时间最短为5.26年,最长为9.33年。盐湖集水区域由于卓乃湖溃堤已扩大为卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔湖流域,加之可可西里地区受气候暖湿化的影响,盐湖面积今后还将呈持续增大趋势,并对其周边重大工程设施产生不利影响。

3 结论与讨论

受青藏高原暖湿化的影响,近56年来可可西里地区气候总体上呈现暖湿化趋势。进入21世纪以来,气候暖湿化趋势更加明显。2011年以前气候暖湿化是盐湖面积缓慢扩大的主要原因;冰川和冻土融水可能是引起可可西里盐湖面积扩张的原因,但并非主要原因;上游卓乃湖溃堤导致盐湖面积从卓乃湖溃堤前2011年8月22日的45.9 km²扩大至2017年的161.44 km²。近40多年来,盐湖面积先后经历了缓慢增大(1976-2011年)→急剧增大(2012-2013年)→稳定增大(2014-2017年)三个阶段。

盐湖面积显著扩大,高浓度盐分的湖水破坏了周边的草地植被,并对其临近区域的通讯缆线、输油管线、国防设施等产生侵蚀作用;另一方面,盐湖面积扩大导致湖水淡化,有利于湖中藻类的生长。流域淹没分析表明,如果盐湖水位再上涨10 m,盐湖湖水就会发生外流,并威胁到青藏铁路、青藏公路的运行安全。

由于可获取的晴空遥感影像资料十分有限(Landsat TM/ETM+和环境减灾卫星的时间分辨率分别为16天和2天),HJ-A/B卫星CCD数据为光学遥感影像,受天气过程影响大,多数遥感影像图上云量较大。另外,环境减灾卫星和高分一号卫星受水体混浊度、季节、天气和周边环境、CCD传感器各通道波长较长等因素的影响较大,需要根

据上述诸多因素来设置水体识别模式的阈值。基于多源卫星的湖泊水患动态监测是大势所趋。目前位于盐湖上游的卓乃湖因溃堤已失去将近一半的储水功能,且和下游的库赛湖、海丁诺尔湖连为一体,盐湖集水区域已扩大为卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔湖及盐湖流域,加之可可西里地区受气候暖湿化的影响,盐湖面积今后还将呈持续增大趋势,并对其周边重大工程设施产生不利影响。因此,探索多源遥感资料的快速融合算法及湖泊水体扩张过程模拟预测方法,对盐湖进行长期持续高效地监测其动态变化特征,仍然是今后可可西里地区湖泊水患预警研究与灾害防治的重点。

参考文献(References):

- [1] Zhu Liping, Xie Manping, Wu Yanhong. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(13): 1294-1303. [朱立平, 谢曼平, 吴艳红. 西藏纳木错1971-2004年湖泊面积变化及其原因的定量分析[J]. 科学通报, 2010, 55(18): 1789-1798.]
- [2] Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. Interannual and interdecadal changes of temperature and precipitation in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(2): 157-170. [韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 157-170.]
- [3] Li Shijie, Li Wanchun, Xia Weilan, et al. The preliminary report of modern lakes changes and investigation in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Lake Science, 1998, 10(4): 95-96. [李世杰, 李万春, 夏威岚, 等. 青藏高原现代湖泊变化与考察初步报告[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 95-96.]
- [4] Liu Baokang, Li Lin, Du Yu'e, et al. Causes of the outburst of Zonag Lake in Hoh Xil, Tibetan Plateau, and its impact on surrounding environment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 305-311. [刘宝康, 李林, 杜玉娥, 等. 青藏高原可可西里卓乃湖溃堤成因及其影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 305-311.]
- [5] Zhang Yuxin, Xie Changwei, Zhao Lin, et al. The formation of permafrost in the bottom of the Zonag Lake in Hoh Xil on Qinghai-Tibet Plateau after an outburst: monitoring and simulation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(5): 949-956. [张钰鑫, 谢昌卫, 赵林, 等. 青藏高原可可西里卓乃湖溃决出露湖底多年冻土形成过程的监测与模拟[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 949-956.]
- [6] Baban S M J. Use of remote sensing and geographical information systems in developing lake management strategies[M]//The Ecological Bases for Lake and Reservoir Management. Springer, Dordrecht, 1999: 211-226.
- [7] Birkett C M. Synergistic remote sensing of Lake Chad: variability of basin inundation[J]. Remote sensing of environment, 2000, 72(2): 218-236.
- [8] Lu Anxin, Wang Lihong, Yao Tandong. Study on remote sensing method of modern change of Qinghai-Tibet Plateau lakes[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(3): 174-177. [鲁安新, 王丽红, 姚檀栋. 青藏高原湖泊现代变化遥

- 感方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(3): 174-177.]
- [9] Li Junli, Sheng Yongwei, Luo Jiancheng et al. Remote sensing mapping of inland lakes change in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(3): 311-320. [李均力, 盛永伟, 骆剑承, 等. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图[J]. 湖泊科学, 2011, 23(3): 311-320.]
- [10] Han Fang, Li Xinghua, Gao Layun. The dynamic characteristics of Dalinuoer Wetland in Inner Mongolia based on remote sensing [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2007, 28(1): 74-78. [韩芳, 李兴华, 高拉云. 内蒙古达里诺尔湖泊湿地动态的遥感监测[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 74-78.]
- [11] Ma Mingguo, Song Yi, Wang Xuemei. The dynamic monitoring study of remote sensing of Ruoqiang Lake group of Xinjiang in 1973-2006[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1237-1246. [马明国, 宋怡, 王雪梅. 1973-2006 年新疆若羌湖泊群遥感动态监测研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1237-1246.]
- [12] Shao Zhaogang, Zhu Dagang, Meng Xiangang, et al. Discussion on the present climate change from warm dry to warm wet in Northwest China[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(12): 1633-1645. [邵兆刚, 朱大岗, 孟宪刚, 等. 青藏高原近 25 年来主要湖泊变迁的特征[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1633-1645.]
- [13] Zhang Jicheng, Jiang Qigang, Li Yuanhua, et al. Study on dynamic monitoring and climatic background of lake change in Tibet based on RS/GIS[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(1): 87-93. [张继承, 姜琦刚, 李远华, 等. 基于 RS/GIS 的西藏地区湖泊变化动态监测及气候背景[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 87-93.]
- [14] Bianduo, Yang Zhigang, Li Lin, et al. The response of lake changes to climate fluctuations in Nagqu Region, Tibet in recent 30 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 510-518. [边多, 杨志刚, 李林, 等. 近 30 年来西藏那曲地区湖泊变化对气候波动的响应[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 510-518.]
- [15] Duan Shuiqiang, Cao Guangchao, Liu Tao, et al. The recent expansion characteristics and origin of lakes of Qiangtang basin in Qinghai Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1237-1246. [段水强, 曹广超, 刘弢, 等. 青海羌塘盆地近期湖泊扩张特征及成因[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1237-1246.]
- [16] Zhang Guoqing, Xie Hongjie, Kang Shichang, 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.
- [17] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Overflow probability of the Salt Lake in Hoh Xil region[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1520-1527. [姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 可可西里地区盐湖湖水外溢可能性初探[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1520-1527.]
- [18] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm dry to warm wet in Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 154-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四季研究, 2003, 23(2): 154-164.]
- [19] Shi Yafeng. China concise glacier inventory [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005. [施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.]
- [20] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16. [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, 70(1): 3-16.]
- [21] Zhao Lin, Cheng Guodong, Li Shuxun, et al. Thawing and freezing processes of active layer in Wudaoliang region of Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(23): 2181-2187. [赵林, 程国栋, 李述训, 等. 青藏高原五道梁附近多年冻土活动层冻结和融化过程[J]. 科学通报, 2000, 45(11): 1205-1211.]
- [22] Liu Baokang, Du Yu'e, Li Lin, et al. Outburst flooding of the moraine-dammed Zhuonai Lake on Tibetan plateau: causes and impacts [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(4): 570-574.
- [23] Chang Yaping, Zhong Dan, Li Haojie, et al. Land surface temperature retrieved from HJ-1B satellite data in the upper reaches of the Shule River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(4): 954-962. [昝亚平, 种丹, 李浩杰, 等. 基于 HJ-1B 卫星数据的疏勒河上游流域地表温度反演[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 954-962.]

Dynamic change and cause analysis of Salt Lake area in Hoh Xil on Qinghai-Tibet Plateau during 1976 – 2017

DU Yu'e^{1,2}, LIU Baokang^{3,4}, HE Weiguo⁵, DUAN Shuiqiang⁶, HOU Fujiang¹, WANG Zongli¹

(1. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. Natural Energy Research Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730020, China; 3. Qinghai Institute of Meteorological Sciences, Xining 810001, China;

4. Key Laboratory of Disaster Prevention and Disaster Reduction in Qinghai Province, Xining 810001, China;

5. Information Science School, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou 510320,

China; 6. Hydrology and Water Resource Bureau of Qinghai Province, Xining 810001, China)

Abstract: Lakes on the Tibetan Plateau are sensitive indicators of global climate change. In the last 55 years, the climate of the Hoh Xil region showed a significant warm and wet trend, in which the temperature rise rate was $0.33\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($R=0.746$, $P<0.01$), and the increasing rate of precipitation was $23.4\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ($R=0.422$, $P<0.01$). Over the past 40 years, the area of salt lake has shown an increasing trend. Among them, the area of Salt Lake before dike burst increased by $1.63\text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ from 1976 to 2011, and after dike burst it continued to expand at the rate of $8.51\text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$. On the whole, in the past 40 years, the area of Salt Lake has experienced three stages: slowly increasing (1976 – 2011) → sharply increasing (2012 – 2013) → steadily increasing (2014 – 2017). The main reason for the early expansion of the Salt Lake area was the warm and wet of the climate in the Hoh Xil region. The reason for the sharp increase in the area in the later period was due to the dike burst of the Zonag Lake in the upper branches of the Salt Lake on September 15, 2011, resulting in three lakes downstream (Lake Kosei, Lake Dinard Noir), and Salt Lake are connected in a row; glacial and frozen water melting may be the cause of the expansion of the Hoh Xil Salt Lake area, but it is not the main reason. In the later period, the area of Saline Lake will also show a steady increase trend. The expansion of the Salt Lake area has led to the desalinization of Salt Lake, and the area where the surrounding grassland has been submerged and destroyed continues to expand. Which not only damages the ecological environment surrounding grassland, but may also have an adverse effects on major engineering facilities around Hoh Xil. In view of the fact that the area of Salt Lake will continue to increase in the future, it will adversely affect the major engineering facilities around it. Therefore, long-term and continuous tracking and observation of Salt Lake Lake using multi-source satellite data will remain the focus of relevant government departments.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Hoh Xil; Salt Lake area; outburst of Zonag Lake; cause analysis

(本文编辑: 周成林)