

可可西里盐湖湖水外溢可能性初探

姚晓军¹, 孙美平^{1,2}, 官 鹏¹, 刘宝康³, 李晓锋¹, 安丽娜¹, 马 超¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所
冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001)

摘要: 2011年9月可可西里地区卓乃湖溃决后, 关于盐湖湖水能否外溢进入楚玛尔河继而成为长江的最北源是公众及学界普遍关注的话题。本研究基于2010-2015年 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像、SRTM 1 弧秒数据、Google Earth 高程数据和五道梁气象站观测数据, 首次对盐湖变化、湖水外溢条件及其可能性进行分析。结果表明: 卓乃湖溃决后, 盐湖在2011年10月至2013年4月期间面积急剧增加, 之后湖泊进入稳定扩张期, 2015年10月27日盐湖面积为151.38 km², 是2010年3月3日湖泊面积的3.35倍。盐湖发生湖水外溢的条件是湖泊面积达到218.90~220.63 km²。由于SRTM和Google Earth高程数据间的差异, 盐湖湖水外溢时的水位将比当前高12 m或9.6 m, 相应湖泊库容增加23.71 km³或17.27 km³, 届时湖水将由湖泊东侧流入清水河流域。尽管盐湖在未来10年内不可能发生湖水外溢, 但是随着盐湖集水区的扩大及预估的区域未来降水量的增加, 在更长时间尺度内盐湖发生湖水外溢并成为长江支流的可能性依然存在。

关键词: 湖水外溢; 盐湖; 可可西里; 青藏高原

DOI: 10.11821/dlxb201609005

1 引言

2011年9月14日, 位于可可西里地区的卓乃湖发生溃决, 洪水经冲出的洪沟和库赛河流入库赛湖^[1]。9月20-30日期间, 库赛湖因水量急剧增加出现湖水外溢, 并导致其下游的海丁诺尔发生类似的情况, 湖水最终汇入海丁诺尔东侧的盐湖^[2]。尽管学术界对于卓乃湖溃决原因尚存争议, 如姚晓军等认为可可西里地区降水增加和蒸发减少是卓乃湖溃决的主要原因^[2-3], 杨勇则认为是古河道中季节河流的溯源侵蚀所致^[1], 但毋庸置疑的是, 卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔和盐湖4个湖泊因卓乃湖溃决自上而下建立了水力联系。位于最下游的盐湖作为流域地表径流的最终“接收者”, 如果湖泊面积持续增加, 是否会发生与库赛湖和海丁诺尔类似的情况呢? 一旦盐湖外溢水流经清水河汇入楚玛尔河, 则卓乃河将成为长江的最北源。此外, 由于卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔和盐湖为矿化度较高的半咸水湖或盐湖^[4-5], 外溢湖水不仅可能对长江水体水质及生态环境造成影响, 而且可能使流经地区的冻土活动层厚度增加^[6], 继而对以冷却地基为主要手段的青藏公路和青藏

收稿日期: 2016-06-01; 修订日期: 2016-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41261016); 甘肃省高等学校科研项目(2014A-001, 2013A-018); 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLCS-OP-2016-10) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41261016; Scientific Research Project of Higher Learning Institution in Gansu Province, No.2014A-001, No.2013A-018; Opening Foundation Project of State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, CAS, No.SKLCS-OP-2016-10]

作者简介: 姚晓军(1980-), 男, 山西夏县人, 博士, 副教授, 研究方向为地理信息技术与冰冻圈变化。

E-mail: xj_yao@nwnu.edu.cn

铁路等寒区工程造成危害^[7]。要回答上述问题,对盐湖湖水外溢的可能性进行分析和探讨则是关键。

2 研究区概况

盐湖(35°32'N, 93°25'E)以产盐而得名,又名68道班盐湖^[5]。盐湖位于可可西里国家级自然保护区东北部,距索南达杰保护站约12 km,行政区划上隶属于青海省玉树藏族自治州治多县(图1)。盐湖形成于昆仑山中段第三纪陆相断陷盆地内,盆地外围为第三系上新统陆相地层构成的残丘,滨湖为第四系全新统湖沼沉积,湖泊主要靠南北两侧的季节性河流补给^[4]。湖中原有2个石质小岛,2012年因湖泊水位上涨而被淹没。湖区属青南高寒草原半干旱气候,年均气温-4.0~-1.0℃,年降水量150~200 mm。据《中国湖泊志》^[4],盐湖矿化度高达221.35 g/L,属硫酸镁亚型盐湖,局部发育硫酸钠亚型和碳酸盐型卤水,盐类矿物沉积以石盐+芒硝+石膏为特征。20世纪80年代盐湖已被开采,多运往西藏日喀则等地作为食用盐^[5]。随着可可西里自然保护区的成立,盐业开采活动现已停止。

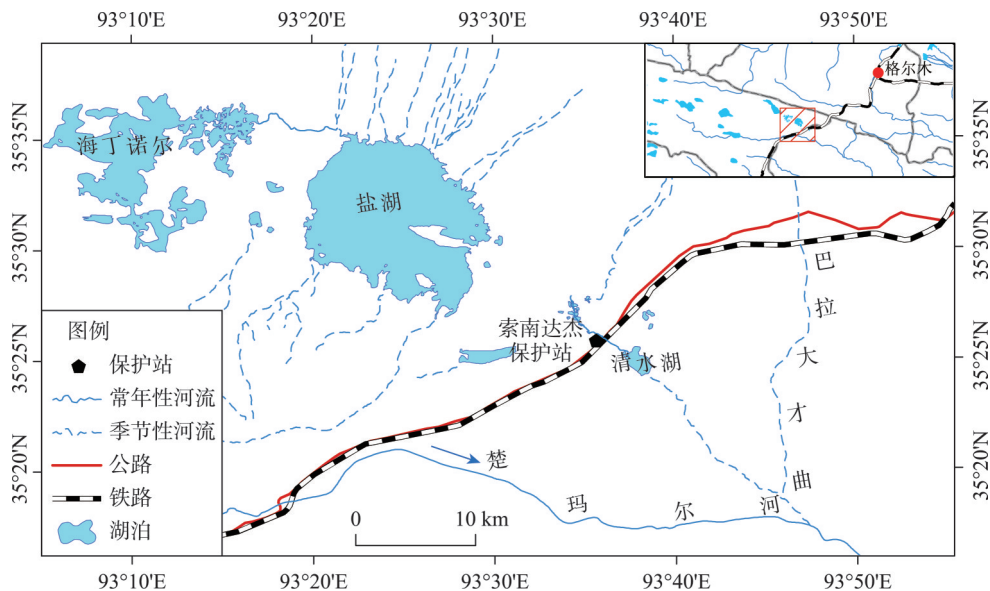


图1 盐湖地图

Fig. 1 The Salt Lake map

在盐湖西北侧,自东向西依次分布着海丁诺尔、库赛湖和卓乃湖(图2)。2011年9月卓乃湖溃决之前,上述3个湖泊均为闭流类湖,其中卓乃湖主要依赖源于五雪峰冰川融水的卓乃河补给,库赛湖则依赖源于昆仑山大雪峰和雪月山的库赛河补给,海丁诺尔以时令河和地表径流补给为主。卓乃湖溃决后,库赛湖—海丁诺尔湖水外溢链式反应使盐湖面积迅速扩张^[2],并在彼此之间形成河道。

3 数据与方法

3.1 数据源

为获取盐湖变化情况,共搜集和整理2010-2015年Landsat TM/ETM+/OLI遥感影像

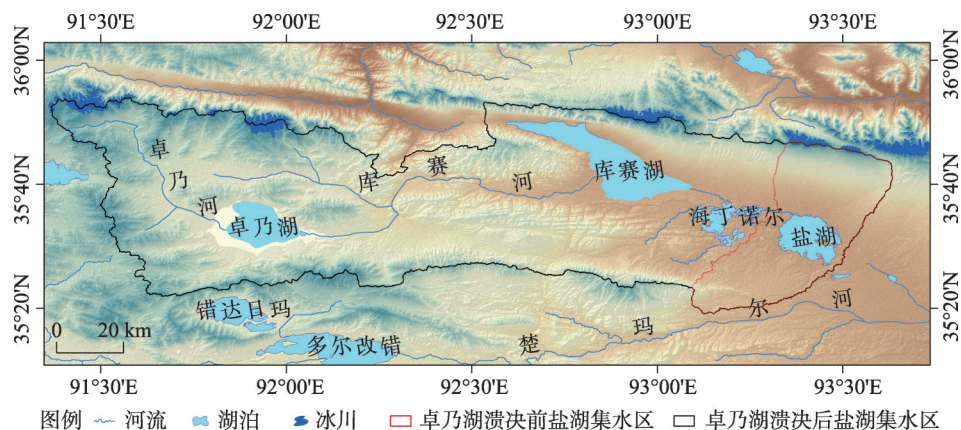


图2 盐湖周边湖泊

Fig. 2 Lakes in the neighborhood of the Salt Lake

81 景, 轨道号为 137035 和 138035, 该数据从 USGS 网站 (<http://glovis.usgs.gov>) 下载获得。采用 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像作为湖泊基本数据源有诸多优点, 如影像都经过几何校正处理, 减少了数据预处理工作; 有效避免 Landsat ETM+ 遥感影像由于扫描行校正器故障造成的坏带影响, 同时可通过交叉验证方法提高湖泊识别的精度。受湖面被云(雪)覆盖影响, 6 月、7 月、9 月和 12 月 4 个月份高质量遥感影像较少, 分别为 4 景、5 景、3 景和 3 景。

本研究用到的数字高程模型 (DEM) 数据包括 SRTM 1 弧秒数据和 Google Earth 高程数据。其中, SRTM 1 弧秒数据对应的空间分辨率约为 30 m, 由 NASA、NIMA、德国及意大利航天机构于 2000 年 2 月通过“奋进”号航天飞机上搭载的 SRTM 系统采集获得, 2014 年底由 NASA (<http://www2.jpl.nasa.gov>) 公开。Google Earth 将航拍照片、卫星影像和 GIS 数据进行了有效整合, 已被广泛应用于 GPS 控制网布设、专题地图制图和大比例尺地形辅助测绘等领域^[8]。同时, Google 公司提供了 Google Earth API 供开发人员进行二次开发以提取相关信息^[9]。已有的研究表明, 基于 Google Earth 高程提取的地形特征线与其影像相符^[10], 且精度优于 1:5 万地形图^[8]。本研究区可提取到的 Google Earth 高程数据空间分辨率约为 15 m。此外, 选用距盐湖最近的五道梁气象台站资料作为研究区湖泊变化气候背景参考, 数据由中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 提供。

3.2 研究方法

由于水体在近红外波段处的强吸收性和蓝光波段处的较强反射性, 因此通过遥感影像的波段组合或波段运算可以较为容易地辨识和提取水体。湖泊作为水体的类型之一, 目前较常用的湖泊范围提取方法主要有目视解译法、归一化差分水体指数法 (NDWI) 和改进的归一化差分水体指数法 (MNDWI), 其中后两者的主要区别在于近红外波段和中红外波段的选择^[11-12]。鉴于本研究仅提取盐湖范围, 试验表明应用 NDWI 或 MNDWI 方法对遥感影像的预处理和提取结果的后处理工作量并不少于人工目视解译方法, 因此统一采用人工目视解译方法, 提取精度限制在 1 个像元以内。

在获取盐湖范围基础上, 假设在某一时刻 (如遥感影像获取日期) 湖泊水位保持不变, 通过设置 DEM 数据高程值, 分别以 0.1 m (Google Earth 高程数据) 和 1 m (SRTM 1 弧秒数据) 为步长经循环直至低于某一高程值的范围与解译的湖泊范围一致, 则可获取不同时期湖泊所对应的水位高度, 继而通过栅格代数运算获得湖泊水量变化, 计算公式如下所示:

$$\Delta V = (S_i \times (h_j - h_i) + (S_j - S_i) \times (h_j - h_{DEM})) / 1000 \quad (1)$$

式中: ΔV 为湖泊水量变化 (km^3); S_i 、 S_j 分别为*i*、*j*时刻的湖泊面积 (km^2); h_i 、 h_j 分别为*i*、*j*时刻的湖泊水位 (m); h_{DEM} 为*i*时刻湖泊未被淹没地表的高程值 (m)。

最后, 利用ArcGIS软件提供的水文分析功能提取盐湖与清水湖之间的分水岭, 并通过DEM高程值循环迭代直至盐湖湖水外溢流入清水湖所在的流域, 等于该高程值且与目前盐湖相连的范围即为理论上的盐湖最大范围, 利用式(1)亦可获取满足这一条件所需的湖泊库容增量。

4 结果与讨论

4.1 2010-2015年盐湖时空变化特征

从2010-2015年盐湖的演化过程看(图3), 在2011年10月海丁诺尔湖水未进入盐湖之前^[2], 盐湖面积虽有所增加(2010年3月3日盐湖面积为45.18 km^2 , 2010年10月29日为47.61 km^2), 但扩张幅度仅为5.37%, 湖泊面积呈缓慢增加趋势, 湖泊扩张区域主要位于东北部。2011年11月9日, 盐湖面积迅速增加为73.18 km^2 ; 之后盐湖进入一个快速扩张时期, 2011年12月11日湖泊面积为84.29 km^2 , 2012年5月19日为99.33 km^2 , 至2012年10月26日盐湖面积增加为134.19 km^2 , 较2010年10月29日的湖泊规模扩大了近3倍。从2013年4月12日开始, 盐湖再次转为规模扩张相对缓慢期, 但面积增加幅度(3.43 km^2/a)仍大于2011年之前(2.43 km^2/a), 并在湖泊东、西、南侧形成9个湖心岛, 其中面积最大的湖心岛(0.53 km^2)位于盐湖南侧, 至2015年10月27日盐湖面积增加为151.38 km^2 , 这与Liu等^[13]基于HJ1A/B遥感影像的解译结果一致。

2010-2015年期间, 盐湖库容变化趋势与其面积变化趋势基本一致(表1)。由于SRTM 1弧秒数据为整型值, 而Google Earth高程数据为浮点型数值, 因此基于前者计算

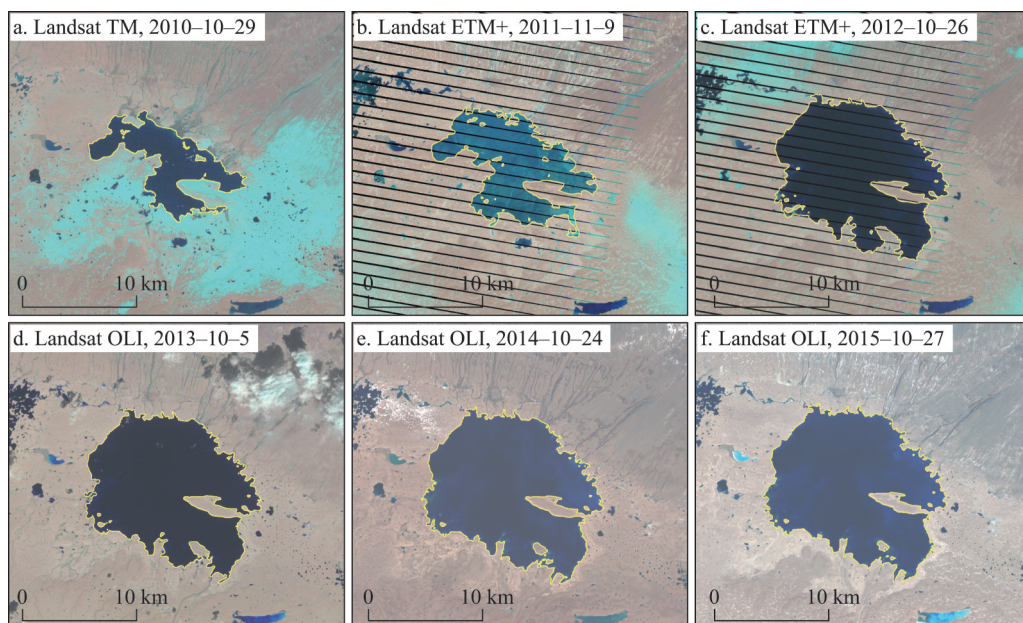


图3 2010-2015年盐湖变化

Fig. 3 Variations of the Salt Lake from 2010 to 2015

表 1 2010-2015 年盐湖库容变化

Tab. 1 Reservoir capacity changes of the Salt Lake from 2010 to 2015

时间	基于 SRTM 1 弧秒数据 计算的库容变化(10^8 m^3)	基于 Google Earth 高程数据 计算的库容变化(10^8 m^3)
2010 年 3 月 3 日-2010 年 10 月 29 日	0.80	—
2010 年 10 月 29 日-2011 年 11 月 9 日	4.46	2.64
2011 年 11 月 9 日-2012 年 5 月 19 日	6.08	5.02
2012 年 5 月 19 日-2012 年 10 月 26 日	10.72	10.66
2013 年 4 月 12 日-2014 年 10 月 24 日	2.58	0.56
2014 年 10 月 24 日-2015 年 10 月 27 日	2.00	—

注：表中“—”无法计算盐湖库容变化，原因为研究时段内 DEM 数据最大高程值相同。

得到的盐湖库容变化普遍大于后者，但二者变化趋势基本吻合。受 DEM 精度限制，基于 Google Earth 高程数据无法计算出 2010 年年内和 2014-2015 年库容变化。2010 年 10 月 29 日-2014 年 10 月 24 日期间，基于 SRTM 1 弧秒数据计算的盐湖库容总变化为 $23.84\times 10^8\text{ m}^3$ ，基于 Google Earth 高程数据的结果为 $18.88\times 10^8\text{ m}^3$ ，如考虑库赛湖和海丁诺尔对卓乃湖来水的截留（事实上库赛湖和海丁诺尔面积均较卓乃湖溃决前增加^[2]），则卓乃湖的溃决水量将超过杨勇之前估算的数值^[1]。如上述所言，2013 年 4 月 12 日之后盐湖转为规模扩张相对缓慢期，这意味着因卓乃湖溃决洪水及库赛湖和海丁诺尔外溢湖水汇入而使盐湖规模迅速增大的时期终结，如 2013 年 9 月 5 日-2015 年 9 月 30 日卓乃湖面积变化甚小，稳定在 161 km^2 左右^[13]，盐湖面积及库容变化将主要受流域内地表径流的影响。与卓乃湖溃决前的盐湖变化相比，2013 年之后盐湖面积和库容变化都较大，其原因是卓乃湖溃决使库赛湖、海丁诺尔和盐湖由各自独立的流域转变为一个流域（图 2），作为流域地表径流的最终汇入地，盐湖的集水区面积由之前的 1261.64 km^2 急剧增加为 8563.54 km^2 。除接纳来自自身流域内的地表径流外，海丁诺尔上游来水亦可经新形成的河道汇入盐湖，如与 2010 年盐湖库容变化相比，来自海丁诺尔及其上游流域的水量介于 $1.20\times 10^8\sim 1.78\times 10^8\text{ m}^3$ 之间，成为盐湖重要的水源补给。

4.2 盐湖湖水外溢条件及模拟

通过 DEM 高程值循环迭代，模拟不同海拔盐湖的淹没范围，当湖泊范围跨越盐湖与清水湖所在流域间的分水岭时，则为满足盐湖湖水外溢的条件。图 4 为基于 SRTM 1 弧秒

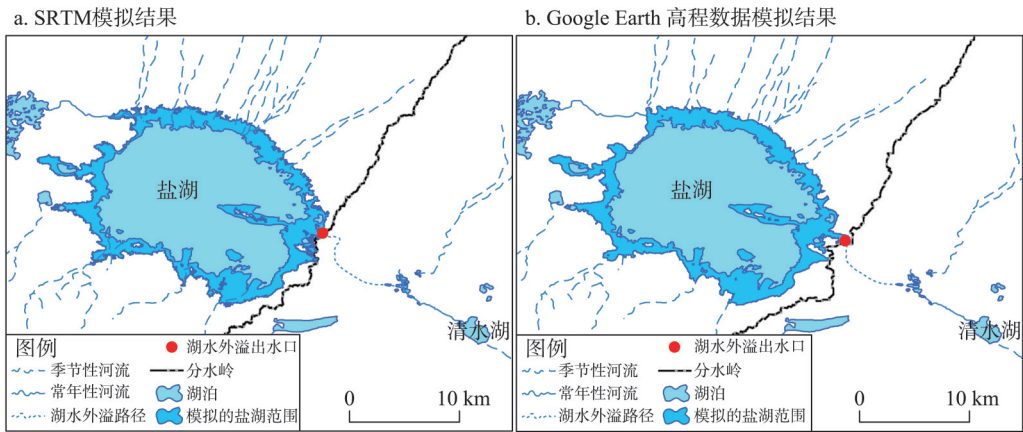


图 4 湖水外溢时的盐湖范围

Fig. 4 The expansion range of the overflowed Salt Lake

数据和 Google Earth 高程数据模拟的盐湖达到湖水外溢条件时的湖泊范围,不同数据计算结果均显示盐湖将朝四周扩张,位于东南部的狭窄区域演化为湖心岛。由于两种 DEM 数据的差异,模拟的盐湖范围略有所不同,其中 SRTM 1 弧秒数据模拟的盐湖面积将达 220.63 km^2 , Google Earth 高程数据结果为 218.90 km^2 ,二者相差 1.73 km^2 。届时盐湖水位将分别达到 4473 m (SRTM) 或 4476.3 m (Google Earth),较当前湖泊水位仅高 12 m (SRTM) 和 9.6 m (Google Earth),这与藏北地区许多湖泊之间具有较低的分水岭一致^[1]。与表 1 计算结果类似,基于 SRTM 1 弧秒数据计算的库容变化大于 Google Earth 高程数据,前者为 23.71 km^3 ,后者为 17.27 km^3 。需要指出的是,尽管两种 DEM 数据模拟的盐湖面积和库容有所差异,但模拟结果均显示当盐湖发生湖水外溢时,其水流进入清水湖流域的位置均在 $35^\circ 28' 47'' \text{N}$, $93^\circ 30' 10'' \text{E}$ 附近。

4.3 盐湖湖水外溢可能性分析

根据五道梁国家气象台站监测数据,1970-1995 年年降水量波动较为剧烈,多年平均降水量为 264.8 mm ; 1996 年之后降水量呈现较为明显的上升趋势,尤其是 2008-2014 年期间年平均降水量高达 383.2 mm ,较 1995 年之前增加 44.71% (图 5)。大量研究表明,21 世纪前半叶青藏高原降水将增加,高原北部和西部地区为增幅大值区^[14-16]。在 RCP 2.6 和 RCP 8.5 情景下,青藏高原在近期 (2006-2035 年) 年平均降水相对于基准期 (1961-2005 年) 将增加 3.2% ^[15]; 在 RCP 4.5 情景下,21 世纪早期 (2016-2035 年) 青藏高原年平均降水量较参考时段 (1986-2005 年) 将增加 4.4% ^[17]。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。

在假设盐湖所在流域不再发生湖泊溃决突发洪水和湖水增加量维持目前状态前提下,按基于 SRTM 1 弧秒数据得到的年内湖泊水量变化 (2014-2015 年为 2.00 km^3) 计算,则盐湖达到湖水外溢所需的时间为 11.86 年,即至 2026 年 9 月底盐湖湖水将流入清水河流域;如按基于 Google Earth 高程数据计算,湖水外溢所需的时间为 30.83 年,即 2045 年 9 月底。如不考虑蒸发、地表下渗及截流等情况,即流域降水全部汇入盐湖且无水分损耗,盐湖所在流域的径流深应达到 $2.77 \times 10^3 \text{ mm}$ (SRTM) 或 $2.02 \times 10^3 \text{ mm}$ (Google Earth),若以五道梁气象台站 1970-2014 年和 2008-2014 年的多年平均降水量 (分别为 296.6 mm 和 383.2 mm) 来计算,则所需时间最短为 5.26 年,最长为 9.33 年。利用 Penman-Monteith 公式计算的五道梁潜在蒸散发量结果表明,尽管年潜在蒸散发量呈下降趋势,但该数值仍远大于年降水量^[3],即后一种情况在现实中不可能发生。因此,可以认为在未来 10 年内盐湖不可能出现湖水外溢,但在更长时间尺度内这种可能性依然存在。

5 结论

(1) 2010-2015 年期间,位于可可西里地区的盐湖发生了剧烈变化,大致以 2011 年 10 月和 2013 年 4 月为界,盐湖经历了降水增加导致的湖泊缓慢扩张、卓乃湖溃决—库赛湖和海丁诺尔湖水外溢连锁反应引发的湖泊面积快速增加、集水区扩大促成的湖泊稳定

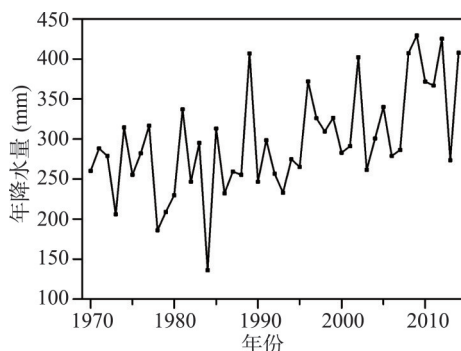


图5 1970-2014年五道梁气象台站降水变化
Fig. 5 Precipitation variation observed at Wudaoliang meteorological station from 1970 to 2014

扩张3个阶段。至2015年10月27日盐湖面积为151.38 km², 是2010年3月3日湖泊面积的3.35倍。基于SRTM 1弧秒和Google Earth高程数据的模拟结果表明, 2010年10月29日-2014年10月24日期间, 盐湖库容增加了 $18.88 \times 10^8 \sim 23.84 \times 10^8$ m³。

(2) 盐湖发生湖水外溢的条件是湖泊面积达到218.90~220.63 km²。由于SRTM 1弧秒和Google Earth高程数据间的差异, 基于二者模拟的盐湖库容增加量差异较大, 前者为23.71 km³, 后者为17.27 km³。届时盐湖水位将比现在高12 m (SRTM) 或9.6 m (Google Earth), 湖水将沿湖泊东侧流入清水河流域。

(3) 不同假设条件下的模拟结果表明, 盐湖在未来10年内不会发生湖水外溢事件。基于不同典型路径(RCP)情景下的降水评估均显示, 21世纪早期盐湖所在的青藏高原北部地区降水呈增加趋势, 因此, 在更长时间尺度内盐湖发生湖水外溢并成为长江支流的可能性依然存在。

受高精度DEM数据费用昂贵、大比例尺地形图保密及无人区野外科考难度大等因素限制, 本研究利用开源的SRTM 1弧秒数据和基于Google Earth API程序读取的高程数据, 初步探讨了盐湖湖水外溢所需满足的条件及可能性。然而, 由于SRTM与Google Earth高程数据间差异以及无实测数据验证, 影响湖泊水量平衡的所有要素观测数据在本研究区均为空白, 盐湖与清水河流域间的分水岭是否会因气候变暖而发生变化(受冻土活动层厚度增加影响)等原因, 使得评估的盐湖湖水外溢时间可能与实际情况会有较大误差, 而这有赖于更高精度数字高程模型数据的获取。

参考文献(References)

- [1] Yang Yong. No trifle on the Qinghai-Tibet Plateau: The Zhuonai Lake is flooding. Chinese National Geography, 2015 (11): 78-93. [杨勇. 青藏高原无小事: 卓乃湖决堤了. 中国国家地理, 2015(11): 78-93.]
- [2] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Changes of Kusai Lake in Hoh Xil region and causes of its water overflowing. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 689-698. [姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 可可西里地区库赛湖变化及湖水外溢成因. 地理学报, 2012, 67(5): 689-698.]
- [3] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Spatial-temporal variations of lake area in Hoh Xil region in the past 40 years. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7): 886-896. [姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 近40年可可西里地区湖泊时空变化特征. 地理学报, 2013, 68(7): 886-896.]
- [4] Wang Sumin, Dou Hongshen. Records of Chinese Lakes. Beijing: Science Press, 1998: 481-493. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 481-493.]
- [5] Hu Dongsheng. Investigation and study on lake resources in Kekexili region. Arid Land Geography, 1992, 15(3): 50-58. [胡东生. 可可西里地区湖泊资源调查研究. 干旱区地理, 1992, 15(3): 50-58.]
- [6] Wu Qingbai, Niu Fujun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2): 115-130. [吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性. 科学通报, 2013, 58(2): 115-130.]
- [7] Cheng Guodong. Effect of partial factors on permafrost distribution and its suggestion on the Qinghai-Xizang Railway design. Science in China (Series D), 2003, 33(6): 602-607. [程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示. 中国科学(D辑), 2003, 33(6): 602-607.]
- [8] Huang Qi, Zhang Zongyi. A method for earth surface elevation obtained based on Google Earth and its accuracy assessment. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(2): 51-54. [黄琪, 张宗毅. 基于Google软件的农地区高程获取及精度评价. 测绘通报, 2015(2): 51-54.]
- [9] Mo Shanjuan, Li Zhilin, Chen Chengjiang, et al. 3D terrain modeling based on Google Earth: Method and realization. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(2): 39-42. [莫善军, 李志凇, 陈成江, 等. 利用Google Earth建立等高线三维地形模型. 测绘通报, 2012(2): 39-42.]
- [10] Guan Jianchao, Fang Chunming. A Google Earth based new approach to pre-treatment of terrain for river simulation. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(12): 21-24. [关见朝, 方春明. 基于Google Earth的河流模拟地形前处理新方法. 水利水电技术, 2011, 42(12): 21-24.]
- [11] Mcfeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features.

- International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [12] Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595. [徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.]
- [13] Liu B, Du Y, Li L, et al. Outburst flooding of the moraine-dammed Zhuonai Lake on Tibetan Plateau: causes and impacts. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(4): 570-575.
- [14] Chen W, Jiang Z, Li L. Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. Journal of Climate, 2011, 24(17): 4741-4756.
- [15] Su F, Duan X, Chen D, et al. Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau. Journal of Climate, 2013, 26(10): 3187-3208.
- [16] Zhang Renhe, Su Fengge, Jiang Zhihong, et al. An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(32): 3036-3047. [张人禾, 苏凤阁, 江志红, 等. 青藏高原21世纪气候和环境变化预估研究进展. 科学通报, 2015, 60(32): 3036-3047.]
- [17] Hu Qin, Jiang Dabang, Fan Guangzhou. Climate change projection on the Tibetan Plateau: Results of CMIP5 models. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(2): 260-270. [胡琴, 姜大膀, 范广洲. 青藏高原未来气候变化预估: CMIP5模式结果. 大气科学, 2015, 39(2): 260-270.]

Overflow probability of the Salt Lake in Hoh Xil Region

YAO Xiaojun¹, SUN Meiping^{1,2}, GONG Peng¹, LIU Baokang³,
LI Xiaofeng¹, AN Lina¹, MA Chao¹

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environmental
and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

3. Qinghai Institute of Meteorological Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: After the bursting of Huiten Nor in Hoh Xil region in September, 2011, the topic on whether the water overflow from the Salt Lake would enter the Chumaer River and become the northernmost source of the Yangtze River has aroused wide concern from public and academic field. Based on Landsat TM/ETM+/OLI remote sensing images during 2010-2015, SRTM 1 arc-second data, Google Earth DEM data and the observation data from the Wudaoliang meteorological station, the study analyzed the variation of the Salt Lake and its overflowing condition and probability. The results showed that the area of the Salt Lake expanded sharply from October 2011 to April 2013, and then it stepped into a stable expansion period. On October 27, 2015, the area of the Salt Lake reached an area of 151.38 km², or about 3.35 times that of the lake on March 3, 2010. The Salt Lake will overflow when its area reaches the range from 218.90 km² to 220.63 km². Due to the differences of the data between SRTM and Google Earth DEM, the water level of the Salt Lake modeled would be 12 m or 9.6 m higher than the current level when the lake overflowed, and its capacity would increase by 23.71 km³ or 17.27 km³, respectively. Meanwhile, the overflowed water of the Salt Lake would run into the Qingshui River basin from its eastern part. Although the Salt Lake does not overflow in the coming ten years, with watershed expansion of the Salt Lake and the projected precipitation increase in Hoh Xil region, that fact that the probability of water overflow from the Salt Lake and the lake is becoming a tributary of the Yangtze River will exist in the long term.

Keywords: water overflow of the lake; the Salt Lake; Hoh Xil; Tibetan Plateau