

文章编号: 1001-4179(2022)05-0111-07

引用本文: 袁康, 谭德宝, 赵静, 等. 近十年可可西里盐湖水量变化及其影响因素分析[J]. 人民长江, 2022, 53(5): 111-117.

近十年可可西里盐湖水量变化及其影响因素分析

袁康, 谭德宝, 赵静, 文雄飞

(长江科学院 空间信息技术应用研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要: 由于全球气候变暖的影响, 青藏高原湖泊开始逐步扩张, 对自然环境和野外基础设施产生了威胁。为研究气候变化对湖泊水量的影响, 利用 2010~2018 年青海可可西里腹地盐湖(又名 68 道班盐湖)的 CryoSat-2 卫星测高数据和 Landsat 遥感影像数据, 分别提取了盐湖的水位及面积, 结合实测获取的盐湖水下地形数据, 计算并构建库容关系曲线, 并结合气候变化特征进行了驱动力分析。结果表明: ① 2010~2011 年, 湖泊水量增加了 0.2 亿 m^3 , 这一阶段盐湖还是独立湖泊; 之后上游卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔湖 3 个湖泊的湖水开始注入盐湖, 盐湖成为流域水量“接收者”, 水量开始快速增加, 仅 1 a 就暴涨近 12 亿 m^3 (该阶段主要为上游 3 个湖泊溢出水); 2016 年开始以平均每年约 5.5 亿 m^3 的速度上涨; 9 a 间, 盐湖的水量增加近 33 亿 m^3 , 并且作为流域水量的“接收者”, 盐湖还在持续扩张。② 降水量增加是盐湖扩张的主要因素, 温度上升引起的冰川融化和冻土融水是湖泊变化的另一气候因素, 但可能不是决定性因素。

关键词: 高原湖泊; 水量变化; 水位变化; 气候变化; 遥感数据; 68 道班盐湖

中图分类号: TP79; P467

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.05.018

0 引言

湖泊是气候变化敏感的指示器, 湖泊的演变是所在流域水量平衡的结果^[1]。青藏高原作为“地球的第三极”, 拥有海拔最高、面积最大、数量最多的高原湖泊群。近些年来, 气候变暖引起的多年冻土退化和冰川退缩已经得到了许多研究者的证实, 这些因素在湖泊发育中起着越来越重要的作用。由于全球气候变暖所带来的影响, 自 20 世纪 80 年代以来, 青藏高原湖泊数量开始逐步增加, 面积逐渐增大。区域湖泊的扩张开始对自然环境和野外基础设施产生威胁, 因此高原地区的湖泊变化引起了广泛关注。

在早期的湖泊观测中, 主要以传统的地面观测方法为主, 传统的观测方法虽然可以获得较为准确的地面观测数据, 但是由于费时费力, 并且对于人迹罕至的

高原地区来说, 无法获得长期稳定的湖泊观测数据。随着遥感技术的发展, 遥感数据逐渐成为环境监测和资源调查等方面可靠的数据源, 国内外许多学者开始利用遥感数据开展青藏高原湖泊变化的研究。李建成等^[2]使用 Envisat-1 测高卫星提取了长江中下游几个主要湖泊的水位, 证明了测高卫星在内陆湖泊水位提取方面的可行性。Zhang 等^[3]对青藏高原 ICESat 卫星过境的所有湖泊进行了水位提取, 为高原湖泊提供了较为精确的水位数据。宋春桥等^[4]利用 CryoSat-2 测高卫星提取了纳木错 2003~2013 年的水位, 并通过与实测数据对比, 进一步分析了湖泊近 10 a 的水位变化规律。Zhu 等^[5]利用 Landsat 遥感影像提取了纳木错的湖泊面积, 结合湖泊的水下地形数据, 对不同时期湖泊面积与库容的对应关系进行分析, 基于此计算纳木错多年的水量变化。

收稿日期: 2021-03-18

基金项目: 青海高原典型河湖生态安全立体监测及预警关键技术研究项目(2020-SF-151)

作者简介: 袁康, 男, 硕士研究生, 研究方向为流域生态环境立体监测。E-mail: yuankange@163.com

通信作者: 谭德宝, 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利空间信息技术应用研究。E-mail: tdebao@126.com

可可西里地区地处青藏高原腹地,由于地理位置的独特性以及恶劣的自然条件,区域受人类活动干预影响较小,多重因素的加持使得可可西里地区湖泊群在研究高原湖泊自然条件下的演化方面具有得天独厚的优势。2011年9月,卓乃湖受持续的强降雨影响,湖泊水位上涨,于湖泊东南侧地势低洼处发生外溢,湖水大量流入下游库赛湖,短时间内的来水使得库赛湖蓄满溢出,湖水流入海丁诺尔湖,由于海丁诺尔湖无法承载上游来水,进而也发生外溢,流入下游68道班盐湖^[6]。卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔湖和盐湖之间因卓乃湖溃决自上而下建立了水力联系,位于最下游的盐湖目前成为了流域地表径流的最终“接收者”。由于盐湖的持续扩张以及潜在的溢流威胁,目前尚不清楚上游湖泊溢流对于盐湖产生的影响,并且由于缺乏长期监测数据,无法研究盐湖水量的变化规律和对于区域气候变化的响应。因此,本文针对卓乃湖溢流后盐湖变化的现状,基于高原河湖立体监测系统^[7],以CryoSat-2测高数据和Landsat遥感影像数据以及多波束水下地形数据作为数据源,对湖泊的水位及面积进行了提取,并与库容数据相结合构建了盐湖的水位-面积-库容关系曲线,分析了2010~2018年盐湖水量变化趋势,并对盐湖变化的影响因素进行了探讨。

1 研究区域概况

卓乃湖-盐湖流域位于青海省西南部玉树藏族自治州境内,该区域位于唐古拉山、昆仑山之间,属于可可西里地区的核心区域,绝大多数地区没有受到现代人类活动干预,平均海拔高度在4400m以上,气候干旱寒冷,植被类型较为简单,流域内湖泊分布自上而下分别为卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔湖和盐湖(见图1)。2011年卓乃湖溢流以前,卓乃湖-盐湖流域内的湖泊为各自独立的湖泊;溢流发生以后,原本各自独立的湖泊水系相互贯通,水量平衡被打破,由于盐湖在流域内海拔最低,因此整个流域的水量开始在盐湖汇集,盐湖开始逐年扩张,并对下游基础设施安全构成威胁^[8]。

2 数据源和研究方法

2.1 数据源

遥感数据主要为Landsat 5 TM和Landsat 8 OLI卫星数据,数据来源于美国地质勘探局USGS(<https://earthexplorer.usgs.gov>)。在本次研究中,选用的是2010~2018年的盐湖影像数据,该流域降水主要集中在6~9月,而12月初至次年5月初为流域内主要湖泊的封冻期,已有研究表明:在自然条件下,高原湖泊面积受各种因素影响年内变化较大,但一般在9

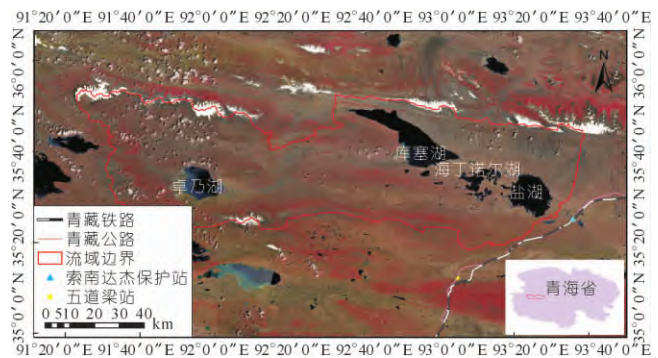


图1 研究区位置示意

Fig.1 Sketch of the study area

~12月份变化不大,湖泊最大面积变化率不会超过2%^[9]。因此,本文在遥感影像选择上,尽量选用9~12月的无云日影像数据,且以汛期结束后10~11月数据为最佳。另外,使用云层覆盖率较小或者云层对于研究区域无影响的数据。如果当月数据受到云层影响,则结合相邻月份的数据对水体边界进行解译。

卫星测高数据为CryoSat-2/SIRAL数据,数据来源于欧洲航天局CryoSat-2科学服务器(<https://science-pds.cryosat.esa.int/>),卫星轨道高度为717km,倾角92°,卫星运行周期为369d并伴随着30d的子循环(369d的周期由连续变化的30d重复模式组成)^[10]。本文使用的为Level-2级数据,该数据级别是经过波形重跟踪后的沿轨表面高程数据,时间跨度为2010~2018年,可以满足大多数的科学研究应用。

多波束水下地形数据来源于长江科学院2018年盐湖流域科学考察,使用的仪器为Teleyne Reson公司的SeaBat T50-R。

气象数据来自青海省五道梁气象站,由中国气象局国家气象信息中心(NMIC)提供,是目前唯一能代表盐湖流域的气象站。

2.2 湖泊面积提取方法

可见光波段和近红外波段的运算可以增强遥感影像中的水体信息,因此本文使用归一化差异水体指数(NDWI)^[11]进行研究区域内水体提取,计算公式为

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (1)$$

式中: ρ_{Green} 为绿光波段,在Landsat 5中为第2波段,在Landsat 8中为第3波段; ρ_{NIR} 为近红外波段,在Landsat 5和Landsat 8中,对应为第4波段和第5波段。基于每个湖泊的原始图像,对湖泊边界进行视觉检查和人工编辑,所有的地图和图像数据投影到UTM坐标系。

2.3 卫星测高数据处理方法

星载雷达测高仪垂直向下发射高频脉冲信号,经

过地表反射回到天线,通过脉冲由反射到接收的时间差(Δt),计算卫星到地球表面的距离(H_{Range}),结合卫星的轨道高度(H_{Altitude}),卫星测高的湖泊水位计算公式为^[12]

$$H_{\text{Range}} = \frac{c\Delta t}{2} \quad (2)$$

$$H = H_{\text{Altitude}} - H_{\text{Range}} - \sigma_{\text{Correct}} \quad (3)$$

式中: H 为湖泊水位; H_{Altitude} 为测高仪的椭球高度; H_{Range} 为测高仪的观测距离; σ_{Correct} 为各项误差改正; c 为光速,计算时取 3×10^8 m/s。

由于内陆湖泊环境因素并不像海洋环境那么复杂,在对海洋水体计算时所使用的海潮、逆气压等校正因素对于内陆水体来说影响相对较小,因此对于内陆湖泊不能完全应用海洋水体的改正方式。对于内陆水体误差改正主要为

$$\sigma_{\text{Correct}} = C_{\text{dry}} + C_{\text{wet}} + C_{\text{lono}} + C_{\text{Set}} + C_{\text{Pol}} \quad (4)$$

式中: C_{dry} 为干对流层改正; C_{wet} 为湿对流层改正; C_{lono} 为电离层改正; C_{Set} 为固体潮改正; C_{Pol} 为极潮改正。

在本文中,采用的数据编辑准则为:①根据 Landsat 影像提取到的湖泊水体边界,筛选湖面水体范围以内的点(借助 surf_type_flags 等参数进行控制);②根据各改正项有效范围,对数据质量进行控制;③根据周期内各水位高程点的高程值与高程均值确定中误差,对各水位点高程差值大于3倍中误差的异常点进行剔除^[13]。

3 结果和讨论

3.1 湖泊面积和水位变化

2010~2018年盐湖水体面积分布如图2所示,通过解译的水体边界,可清楚地看到盐湖水体历年边界的变化情况。可以发现:盐湖面积在2011~2012年才开始猛增,由于水体面积很小,开始时主要向四周扩张;2012~2015年盐湖进入缓慢扩张期,面积变化不显著;在2016年以后扩张加速,水陆交界地带变化明显,湖泊扩张方向主要为东南向。

图3显示了2010~2018年盐湖面积与水位随时间的变化,可以看出:9a间盐湖水位上涨了23.3m,湖泊面积扩张了146.6 km²,面积变化率为303%。在2011年卓乃湖发生溢流以前,盐湖面积和水位无明显变化,面积和水位年平均值分别为45.5 km²和4441.0 m;2011年卓乃湖发生溢出后,由于上游的卓乃湖、库赛湖和海丁诺尔湖来水,盐湖变为流域径流“接收者”,水位和面积开始快速增加,仅2011~2012年,湖泊面积就扩张了62.5 km²,年均水位上涨了近10.0 m。2012~2016年,盐湖开始进入稳定上升期,面积年

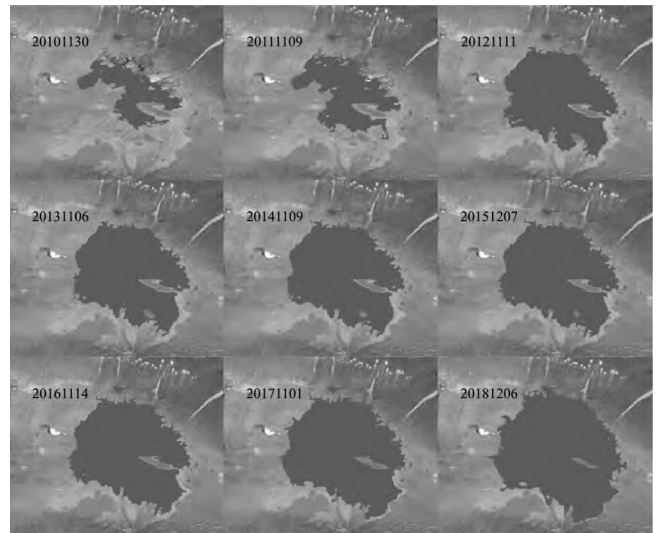


图2 2010~2018年盐湖面积变化

Fig. 2 Water area variation of Salt Lake from 2010 to 2018

平均值为146.9 km²,水位年平均值为4456.4 m;2016~2018年,扩张开始加速,面积和水位分别开始以平均12.6 km²/a和1.9 m/a的速率上升。

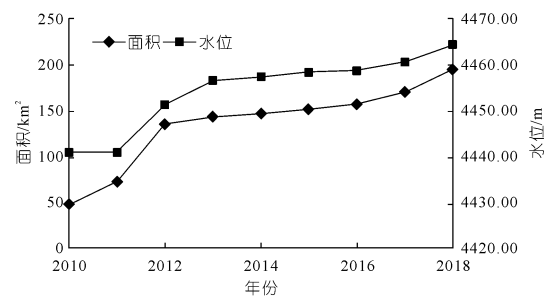


图3 盐湖2010~2018年面积与水位变化

Fig. 3 Area and water level variation of Salt Lake from 2010 to 2018

3.2 湖泊水量变化

基于获得的盐湖水下地形数据,计算盐湖容积,并结合提取的不同时期湖泊水位和面积数据,构建了湖泊的水位-面积-库容关系曲线,分析不同时期湖泊的水量变化。

通过构建的盐湖库容关系曲线,计算2010~2018年盐湖的水量变化过程。2010~2018年间,水位上涨了23.3 m,水量增加了约33.0亿 m³。2010~2011年,湖泊水量增加了0.2亿 m³,这一阶段盐湖还是独立湖泊,主要是受流域降水及冰川融水影响;之后在卓乃湖溢流影响下,卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔湖3个湖泊的湖水开始注入盐湖,盐湖水量开始快速增加,仅1 a就暴涨近12.0亿 m³(该阶段主要为上游3个湖泊溢出水量),并且之后5 a(2012~2016年)以平均每年1.5亿 m³的速度上涨;2016年水量上涨速度加快,可

能是受到降水量增加以及气温升高使冰川融化补给湖泊等气候因素影响,平均每年上涨约 5.5 亿 m³。

3.3 影响因素

气象因子的累积距平可以很好地反映气象因子相对于均值的累加量,因此使用气象因子的累积距平进行相关性分析能更好地反映气象因子对湖泊的影响^[14]。利用 CryoSat-2 提取的盐湖水位高程数据,结合五道梁站的气象数据,对影响湖泊变化的各气象要素进行了量化分析。相关性分析结果表明:湖泊的水位变化与年降水量距平呈显著正相关(0.90),与年平均温度距平呈显著正相关(0.88)($p < 0.01$),与湖泊年蒸发量呈负相关。相关性分析表明降雨量、温度、蒸发量变化对湖泊水位变化产生了重要影响。

3.3.1 降水

对可可西里地区内五道梁气象站的多年降水数据进行统计分析,盐湖流域的降水月份主要为 5~9 月,每年的 6~9 月为流域内汛期,结合多年降水量分析,年均降水量为 328.4 mm,汛期平均降水量为全年降水量的 83.4%,汛期结束后的降雨为全年降雨量的 3.4%。从年平均降水量变化趋势来看,近 30 a 降雨量逐年上升(见图 4),特别是进入 2000 年,降水量明显上升,平均每 10 a 增长 35.6 mm。2003 年以来年平均降水量为 352.4 mm,较之前偏多 21.4%,2007 年以来降水量急剧上升,盐湖水位和面积与年降水量的上升区域具有较好的一致性,这可能是流域内湖泊扩张的主要原因。2010 年以后,降水量连续出现高值,并且由于上游持续的来水,湖泊开始平稳上升;2016~2018 年,降水量出现历史时期最高值,同时湖泊扩张速率较之前也上涨近一倍。因此,降水量增多可能是引起盐湖扩张的主要原因^[15]。

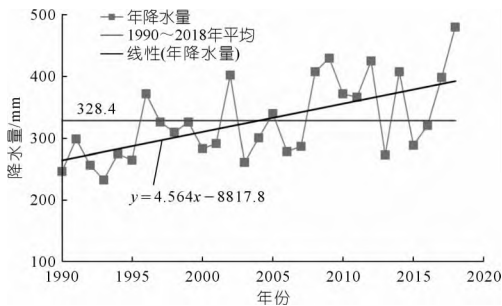


图 4 1990~2018 年可可西里地区年降水量变化
Fig. 4 Annual precipitation changes in Hoh Xil from 1990 to 2018

3.3.2 气温

从 1990~2018 年可可西里地区年平均气温变化图来看(见图 5),多年平均气温呈上升趋势,从变化的

时间节点来看,区域湖泊变化与年平均气温的变化具有较好的一致性。2009 年开始,年平均气温远远高于多年气温平均值,区域湖泊由此也开始进入快速扩张期。气温的上升带来的直接后果就是流域内的冰川、永久积雪融化,冻土层的深度变浅,冻结时间缩短^[16],冰川和冻土融水直接补给流域内湖泊。结合全国第二次冰川编目^[17]分析来看,进入 21 世纪,在全球气候变暖的大背景下,整个可可西里地区冰川成萎缩状态。本文统计了 1990~2018 年流域内冰川面积的整体变化情况(见图 6),流域内湖泊扩张时期,冰川与常年积雪面积呈萎缩态势,但是由于流域内湖泊均与冰川和常年积雪距离较远,因此可能冰雪融水难以对流域内湖泊形成直接有效的补给。另外,根据该区域内五道梁站的多年冻土变化监测数据显示:自 20 世纪 80 年代开始,流域内冻土厚度开始逐年变薄,冻土冻结时间变短,但研究认为只有很少的一部分冻土融水能转化为流动地下水^[18]。综合分析认为:虽然温度的上升导致了区域的冰川和冻土融化,但是真正对于流域内湖泊的补给可能有限,因此盐湖的扩张可能受温度上升带来的影响,但不是盐湖扩张的决定性因素。

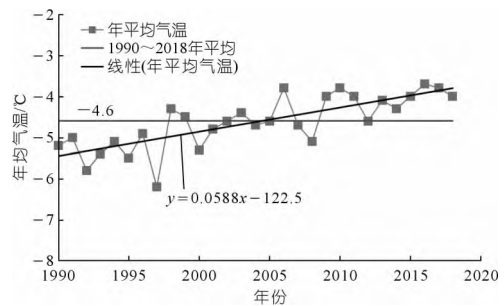


图 5 1990~2018 年可可西里地区年均气温变化
Fig. 5 Annual average temperature change in Hoh Xil from 1990 to 2018

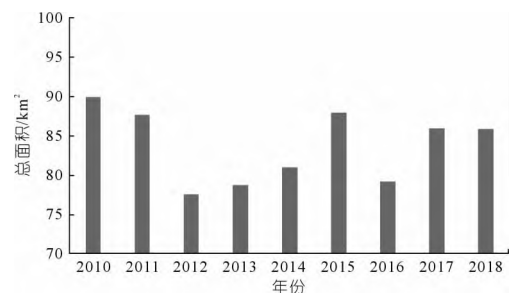


图 6 盐湖流域冰川与常年积雪总面积
Fig. 6 Glaciers and snow area of the Salt Lake Basin

3.3.3 蒸发

1990~2018 年的盐湖蒸发量变化如图 7 所示,盐湖多年平均蒸发量为 771.3 mm,在估算的 29 a 中,湖泊多年蒸发量在 615.4~921.7 mm 之间,总体呈下降

趋势,但下降趋势并不明显。通常认为,温度的上升会导致湖泊蒸发能力的增强,而研究区域内湖泊的蒸发量呈下降趋势。Guo等^[19]的研究发现日照时数和风速的变化是导致湖泊蒸发能力变化的重要因素。因此,对研究区域的日照时数和风速数据进行分析,发现研究时段内年日照时数和风速(见图8)都呈下降趋势,这可能是导致流域内湖泊蒸发能力下降的主要因素。进一步分析发现:自2010年以来,多年湖泊蒸发量均值低于研究时段多年平均值,由于盐湖是内流湖,而湖泊蒸发是湖泊水量的唯一输出,因此蒸发量的减少可能是由湖泊水面蒸发能力的下降所导致。

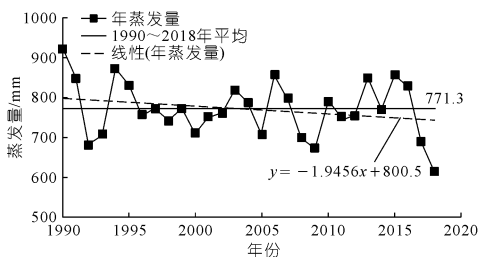


图7 1990~2018年盐湖年蒸发量变化

Fig. 7 Annual evaporation change of Salt Lake from 1990 to 2018

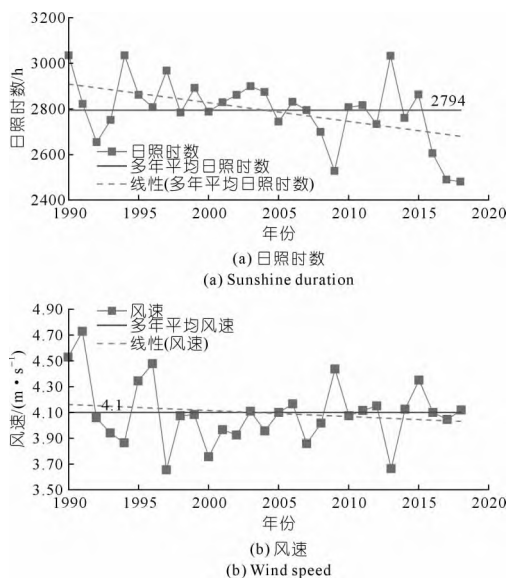


图8 1990~2018年可可西里地区日照时数和风速变化

Fig. 8 Sunshine duration and wind speed change of Hoh Xil from 1990 to 2018

3.4 讨论

本文以盐湖作为研究区,利用卫星测高数据及遥感影像数据提取了盐湖的水位和面积,并结合水下地形数据构建了盐湖的库容曲线,详细地说明了盐湖在卓乃湖溢流前后的水位、面积及水量变化。卓乃湖在2011年9月发生溢流,而盐湖在2011年没有明显变

化,说明库赛湖和海丁诺尔湖在一定程度上缓冲了上游卓乃湖来水量,之后相继外溢,导致盐湖在2011~2012年开始快速扩张。在2013年以后,盐湖增长相对缓慢,这表示盐湖结束了依靠上游卓乃湖、库赛湖和海丁诺尔湖外溢湖水的扩张时期^[8],这一阶段盐湖扩张的主要原因是其作为流域水量的最终“接收者”,4个流域增加的水量均在此汇集。

从影响湖泊变化的气候要素来看,对五道梁站的气象数据进行分析,降雨量的逐年增加和气候变暖导致的冰雪融化及冻土融水是区域湖泊扩张的主要因素^[20],但由于卓乃湖-盐湖流域距离冰川较远,并且受蒸发和下渗的影响,冰川融水可能难以直接有效地补给湖泊^[21]。蒸发量的下降虽然减少了湖泊面积扩张的速度,但并不是面积增大的原因。由于数据资料的限制,本文只使用遥感影像数据和水下地形数据对于盐湖2010~2018年的变化进行了初步分析。另外,在分析湖泊变化的驱动要素时,由于其余气象站距离研究区域太远,只采用了五道梁气象站的数据及部分实测数据进行分析,因此可能与区域实际情况存在一定的误差。在后续的研究中应考虑利用实测数据对遥感数据进行验证,并结合GPCP等气象卫星观测数据对于研究区域气象数据进行补充。

4 结论

本文利用2010~2018年盐湖的CryoSat-2测高数据和Landsat遥感影像数据,结合实地勘测获取的湖泊水下地形数据,分别提取了不同时期的水位和面积,并基于此构建了盐湖的库容关系曲线,结合气候变化特征进行了驱动力分析,得到如下结论。

(1) 利用CryoSat-2卫星测高数据和Landsat影像数据提取2010~2018年盐湖水位和面积发现,9a间水位上涨了23.3m,湖泊面积扩张了146.6km²,面积扩张了近3倍。2011年以前,盐湖面积和水量无明显变化;2011年卓乃湖发生溢出后,由于上游的卓乃湖、库赛湖和海丁诺尔来水,盐湖变为流域径流“接收者”,水位和面积开始快速增加,仅2011~2012年间,湖泊面积就扩张了62.5km²,年均水位上涨了近10m;2012~2016年,盐湖开始进入稳定上升期,面积年平均值为146.9km²,水位年平均值为4456.4m;2016~2018年,扩张开始加速,面积和水量分别开始以12.6km²/a、1.9m/a的速率上升。

(2) 利用实际勘测获取的湖泊数据结合提取的不同时期对应的水位和面积,构建盐湖的水位-面积-库容关系曲线。2010~2011年,湖泊水量增加了0.2亿m³,这一阶段盐湖还是独立湖泊,主要是受流域降

水及冰川融水影响;之后在卓乃湖溢流影响下,仅 1 a 就暴涨近 12 亿 m^3 (该阶段主要为上游 3 个湖泊溢出水) 并且之后 5 a (2012 ~ 2016 年) 以平均每年 1.5 亿 m^3 的速度在上涨;2016 年以后平均每年上涨约 5.5 亿 m^3 。9 a 间,盐湖的水量增加近 33 亿 m^3 ,并且作为流域水量的“接收者”,盐湖还在持续扩张,应当引起持续关注。

(3) 以降水量、温度、蒸发为主要因素,对盐湖水位进行相关性分析发现,降水量的增加是湖泊扩张的主要原因,温度上升引起的冰川和常年积雪融化以及冻土融化也是引起盐湖扩张的气候要素之一。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李建成, 褚永海, 姜卫平, 等. 利用卫星测高资料监测长江中下游湖泊水位变化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(2): 144-147.
- [3] ZHANG G Q, XIE H J, KANG S C, 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.
- [4] 宋春桥, 叶庆华, 程晓. 基于 ICESat/CryoSat-2 卫星测高及站点观测的纳木错湖水位趋势变化监测[J]. 科学通报, 2015, 60(21): 2048.
- [5] ZHU L P, XIE M P, WU Y H. 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.
- [6] 陈强, 冶富寿, 陈育红, 等. 青藏高原可可西里盐湖水量平衡初步分析[J]. 人民长江, 2020, 51(5): 94-98.
- [7] 谭德宝, 吴佳琪, 文雄飞. 可可西里湖泊群立体监测技术方法及应用[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 243-248.
- [8] 姚晓军, 孙美平, 宫鹏, 等. 可可西里盐湖湖水外溢可能性初探[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1520-1527.
- [9] 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] LAXON S W, GILES K A, RIDOUT A L, et al. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(4): 732-737.
- [11] MCFEETERS S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [12] CNES, EUMETSAT, NOAA, et al. OSTM/Jason-2 Products Handbook[M]. 2017.
- [13] 文京川. 测高卫星数据在我国湖库水位监测中的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- [14] 丁永建, 刘时银, 叶柏生, 等. 近 50 a 中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 623-632.
- [15] SONG C Q, HUANG B, RICHARDS K, et al. Accelerated lake expansion on the Tibetan Plateau in the 2000s: Induced by glacial melting or other processes? [J]. Water Resources Research, 2014, 50(4): 3170-3186.
- [16] 车向红, 冯敏, 姜浩, 等. 2000 ~ 2013 年青藏高原湖泊面积 MODIS 遥感监测分析[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 99-107.
- [17] 刘时银, 郭万钦, 许君利. 中国第二次冰川编目数据集(V1.0)[DB/OL]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2014. <http://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/6d44fd19-64d7-4af1-8e81-5fa717585b5b>.
- [18] 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融化过程[J]. 科学通报, 2000, 45(11): 1205-1211.
- [19] GUO Y H, ZHANG Y S, MA N, et al. Long-term changes in evaporation over Siling Co Lake on the Tibetan Plateau and its impact on recent rapid lake expansion[J]. Atmospheric Research, 2019, 216: 141-150.
- [20] 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.
- [21] 姚檀栋. 青藏高原中部冰冻圈动态特征[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 199-206.

(编辑: 谢玲娴)

Analysis on water volume changes and influencing factors of 68 Daoban Salt Lake in Hoh Xil in recent ten years

YUAN Kang ,TAN Debao ,ZHAO Jing ,WEN Xiongfei

(*Spatial Information Technology Application Department ,Changjiang River Scientific Research Institute ,Wuhan 430010 ,China*)

Abstract: Due to the impact of global warming ,lakes on the Qinghai – Tibet Plateau have begun to gradually expand ,posing a threat to the natural environment and field infrastructure. In order to study the impact of climate change on lake water volume , based on CryoSat – 2 satellite altimetry data and Landsat remote sensing image data of the 68 Daoban Salt Lake (Salt Lake) in the hinterland of Hoh Xil ,Qinghai Province from 2010 to 2018 ,we extracted the water level and area of the Salt Lake respectively ,and combined with the measured underwater topographic data to construct a water level – area – volume relationship curve. Based on the characteristics of climate change ,we analyze the driving force of Salt Lake variation. The results showed that: ① from 2010 to 2011 ,the water volume of the lake increased by 20 million cubic meters ,and the Salt Lake was still an independent lake at this stage. After that ,the water from the three upstream lakes ,Zhuonai Lake ,Kusai Lake and Haidingnuoer Lake began to inject into the Salt Lake ,then the Salt Lake became the " receiver" of water in the basin ,and the water volume began to increase rapidly ,rising by nearly 1.2 billion cubic meters in just one year. In 2016 ,the water volume started to rise at an average rate of about 550 million cubic meters per year. In the past 9 years ,the water volume of Salt Lake increased by nearly 3.3 billion cubic meters , and as the " receiver" of water in the basin ,Salt Lake continued to expand. ② Increasing rainfall is the main factors for the expansion of the Salt Lake. Melting glaciers and permafrost meltwater caused by increasing temperature may be another climatic factor for lake changes ,but not the decisive one.

Key words: plateau lake; water volume change; water level change; climate change; remote sensing data; 68 Daoban Salt Lake

(上接第 105 页)

Rocky desertification characteristics in Danjiangkou Reservoir area and cause analysis

YANG Yanfang ,CHENG Yang ,WANG Yong

(*Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification ,Institute of Karst Geology ,Guilin 541004 ,China*)

Abstract: Danjiangkou Reservoir is the water source of the middle route of South – to – North Water Diversion Project. Keeping the water quality in good condition is the key to ensuring the success of the project. In this paper ,the high resolution remote sensing data was used as the data source to obtain the spatial distribution characteristics of karst rocky desertification in the water source area and reservoir area. Karst rocky desertification in the reservoir area was mainly distributed in Xichuan County ,Henan Province ,with a total area of 327.59 km². The incidence rate was 23.11% ,which was 5.7 times that of the water source area. Based on field investigation and geological characteristics ,three typical modes of rocky desertification in the reservoir area were established according to the main controlling factors ,which were rocky desertification caused by human activities ,rocky desertification caused by natural conditions and rocky desertification caused by intensified human activities led by natural conditions. It was pointed out that for the rocky desertification in Danjiangkou Reservoir area ,the geological setting was a material basis ,the climate condition was a background ,and the human activity was a dynamic source. The proposed mode of rock desertification characteristics and its cause can provide a basis for rock desertification control and ecological restoration in the reservoir area ,and provide an important reference for the establishment of rock desertification cause modes in other karst areas.

Key words: rocky desertification; natural condition; human activities; Danjiangkou Reservoir area