

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.025

张嘉琪, 张会兰, 刘雪妍. 1985—2021 年青藏高原典型湖泊水文特征及关键影响因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3):

ZHANG Jiaqi, ZHANG Huilan, LIU Xueyan. Hydrological characteristics and key influencing factors of typical lakes in the Qinghai Tibet Plateau from 1985 to 2021[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

1985—2021 年青藏高原典型湖泊水文特征及关键影响因素

张嘉琪¹, 张会兰^{1,2}, 刘雪妍¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2. 北京林业大学重庆缙云三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 重庆 400711)

摘要: [目的] 青藏高原的湖泊是气候变化的重要指示器, 其扩张或缩减亦对青藏高原自然环境产生重要影响。[方法] 选取位于青藏高原不同气候子区的 3 个典型湖泊(青海湖、羊卓雍错、乌兰乌拉湖), 采用遥感监测手段, 研究 3 个典型湖泊 1985—2021 年水文特征的时空变化规律, 揭示关键气候因子的作用, 并进一步探讨冰川和冻土对典型湖泊的影响。[结果] 研究期间, 青海湖的面积和水位呈显著上升趋势, 面积增长 238.68 km², 水位增长 1.32 m, 空间上则向东西方向扩张; 羊卓雍错湖泊面积呈先波动上升后减少趋势, 面积和水位分别减少 16.31 km² 和 3.25 m, 在空间上整体由四周向中心的萎缩态势; 乌兰乌拉湖面积和水位呈显著上升趋势, 分别增长 125.57 km² 和 8.12 m, 扩张区域主要集中在南部。[结论] 在暖湿化环境下降水增多和冰川冻土加速融化导致的湖泊扩张是青藏高原最为突出的环境变化特征, 其中, 降水量变化是影响青海湖和羊湖面积变化的关键因素, 且面积变化和降水量具有滞后性; 而乌兰乌拉湖水位上升的主要原因是气温升高引起冻土的季节融化。探索青藏高原湖泊面积的变化, 对深入研究全球气候变化及地表水资源评估具有重要指导意义。

关键词: 青藏高原; 湖泊; 面积变化; 水位; 冰川冻土

中图分类号: P333.6

文献标识码: A

Hydrological Characteristics and Key Influencing Factors of Typical Lakes in the Qinghai Tibet Plateau from 1985 to 2021

ZHANG Jiaqi¹, ZHANG Huilan^{1,2}, LIU Xueyan¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China; 2. National Positioning Observation and Research Station of Forest Ecosystem in the Three Gorges Reservoir Area of Jin Yun, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Abstract: [Objective] The lakes of the Tibetan Plateau are important indicators of climate change, and their expansion or contraction also have an important impact on the natural environment of the Tibetan Plateau. [Methods] Three typical lakes located in different climatic sub-regions of the Qinghai-Tibet Plateau (Qinghai Lake, Yangzhuo Yongcuo, and Ulan Ula Lake) were selected to study the temporal and spatial variation of the hydrological characteristics of the three typical lakes from 1985 to 2021 by remote sensing monitoring methods, to reveal the role of key climatic factors, and to further explore the influence of glaciers and permafrost on the typical lakes. [Results] The area and water level of Qinghai Lake showed a significant upward trend, with an area increase of 238.68 km² and a water level increase of 1.32 m. In space, it showed a trend of expansion in the east-west direction. The area and water level of Yangzhuo Yongcuo Lake first fluctuated and then decreased, decreasing by 16.31 km² and 3.25 m respectively. In space, the overall area showed a shrinking trend from the surrounding to the center. The area and water level of Ulan Ula Lake

收稿日期: 2023-11-06

修回日期: 2023-12-15

录用日期: 2024-01-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(52279056)

第一作者: 张嘉琪(1998—), 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要从事流域水文研究。E-mail: 1376314639@qq.com

通信作者: 张会兰(1984—), 女, 河北保定人, 教授, 博士, 主要从事流域水沙过程、侵蚀动力机制、植被生态系统等研究。E-mail: zhanghl@bjfu.edu.cn

showed a significant upward trend, increasing by 125.57 km² and 8.12 m, respectively, and the expansion area was mainly concentrated in the south. [Conclusion] The analysis of key climate factors shows that the lake expansion caused by the increase of precipitation and the accelerated melting of glacial permafrost in the warm and humid environment is the most prominent environmental change characteristics of the Qinghai-Tibet Plateau. The main reason for the rise in the water level of Ulan Ula Lake is the seasonal thaw of permafrost caused by rising temperatures. Exploring the changes in lake area on the Tibetan Plateau is of great guiding significance for in-depth research on global climate change and surface water resource assessment.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; lakes; area change; water level; glacial permafrost

Received: 2023-11-06

Revised: 2023-12-15

Accepted: 2024-01-27

青藏高原地区湖泊众多,面积大小不一,高山内陆湖泊分布在青藏高原不同的气候子区,截止 2018 年,青藏高原面积 > 1 km² 的湖泊数量已经达到约 1 400 个^[1]。近年来,青藏高原气候不断呈暖湿趋势^[2],由于青藏高原地理位置独特,加之受人类活动影响较小,使该地区湖泊的萎缩或扩张对气候变化极为敏感,是全球气候变化的敏感区和生态脆弱区^[3-4],因此,研究青藏高原典型湖泊变化规律,分析出其对气候变化的响应特征有着重要的意义。湖泊快速扩张已成为整个青藏高原最重要的环境变化之一^[5],是探索水文过程、评估水资源和了解气候变化的重要指标。

湖泊变化的监测一般采用水文和遥感观测法,前者适用于地形条件好、交通便利的低海拔地区,后者对青藏高原等监测条件较为困难的无资料或少资料地区更为适合。许多学者^[6-7]采用 Landsat 卫星、Terra 卫星和 Aqua 卫星及哨兵卫星(Sentinel-2)等遥感观测资料来开展高原湖泊面积变化的研究。孟庆伟^[8]以青藏高原的青海湖、纳木错、色林错等 3 个特大型湖泊为研究对象,利用 Landsat MSS 和 ETM+ 数据研究其变迁规律和影响因素;武慧智等^[9]利用多源遥感信息分析高原湖泊从 1970 年到 2000 年左右的动态变化;董斯扬等^[10]通过分析近 40 年青藏高原湖泊面积的变化发现,青藏高原湖泊面积在整体上表现为加速扩张趋势。进一步,研究学者针对青藏高原湖泊变化驱动因素开展研究,王文种等^[11]基于 Landsat 与 Sentinel-3A 卫星数据对藏北高原内陆的当惹雍错湖泊水位水量变化进行归因发现,其受降雨和气温共同影响,年际尺度上的湖泊水量增长与气温具有一致性;郭丰杰等^[12]利用归一化水指数进行面积提取,分析青海湖面积变化与入湖径流量、降水量、蒸发量、温度的响应关系发现,面积变化与降水量变化关系密切且呈现滞后性;闫利等^[13]认为,青藏高原不同种类湖泊变化趋势各不相同,气候变化是影响

湖泊面积变化的重要原因。近几十年,青藏高原的升温速率是全球平均升温速率的 2 倍,并且降水呈现出增长趋势^[14]。朱立平等^[15]从气象要素和水量平衡方面定量分析藏中区西藏纳木错 1971—2004 年湖泊面积变化及原因表明,纳木错流域湖泊水量增加的原因由气温升高引起的冰川融水增加、流域降水量增长以及湖面蒸发量减小共同构成。另有研究^[16]通过对青藏高原内流湖区湖泊水量平衡估算发现,除去降水影响湖泊水量外,冰川消融和冻土退化对青藏高原地区湖泊也有显著影响。青藏高原典型湖泊变化的影响因素复杂,且随着气象或人类活动的变化而变化,不同湖泊水文特征变化的因素存在不同,因此,分析典型湖泊的关键影响因素十分重要。

另外,青藏高原中复杂大气环流和地势格局的制约使高原产生显著的自然地域分异,形成不同的水热状况,其区域气候变化表现出强烈的空间异质特征,不同气候子区湖泊响应的程度和变化特征存在十分明显的时空差异,位于不同气候区的湖泊主导其变化的气候因子也存在不同。中国国家气象局于 1978 年利用气象资料编绘中国气候区划,其中,青藏高原地区被划分为高原气候区,继而根据地形特点及湿润状况将高原气候区划分为 9 个二级气候区,分别为 HD2 藏北区、HC3 藏南区、HC2 藏中区、HB2 昌都区、HA1 波密—川西区、HVVIVIIA1 达旺—察隅区、祁连—青海湖区、青南区和柴达木区(图 1)。分别从气候区划中根据湖泊面积大小选取青藏高原藏北区、藏南区以及祁连—青海湖区 3 个具有代表性的湖泊,分别探讨典型湖泊面积、水位与水位的时空变化规律,并分析气温、降水等关键气候因子与各湖泊变化的相关性及冰川和冻土对湖泊产生的影响。为该区域无资料地区湖泊水文变化提供借鉴,为下一步结合遥感观测和水文模型深入开展湖泊变化的驱动机制研究提供基础。

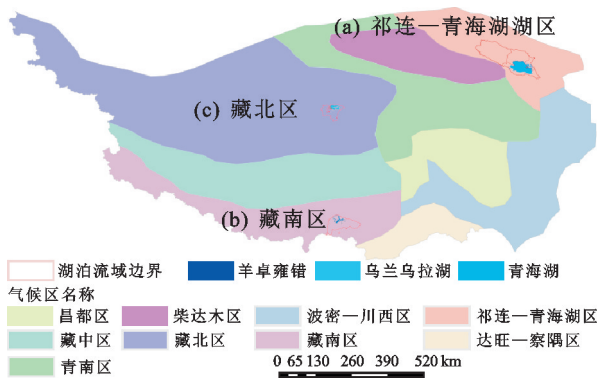


图 1 青藏高原气候区划及湖泊位置

Fig. 1 Climate zoning and lake location of the Qinghai-Tibet Plateau

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青藏高原位于我国西南部,平均海拔超过 4 000 m,总面积约为 $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$,青藏高原湖区是全球海拔最高、数量最多且面积最大的高原内陆湖区,高原内部湖泊分布广泛,总面积高达 $5.0 \times 10^4 \pm 791.4 \text{ km}^2$ ^[17]。青海湖(36°32'—37°15'N,99°36'—100°16'E)位于青藏高原东北部(图 2a),隶属于祁连—青海湖区,是中国最大的内陆湖,湖面海拔 3 196 m,最暖月平均气温 6~10 °C,年降水量 100~300 mm。季节变化大,降水多集中在 5—9 月。高原大陆性气候,暖季短暂,冷季漫长;雨热同季,干湿季分明。

羊卓雍错(90°08'—91°45'E,28°27'—29°12'N)位于西藏自治区山南地区浪卡子县,湖岸曲折蜿蜒,湖体呈枝状分布(图 2b)。位于藏南区,是喜马拉雅山北麓最大的内陆湖。湖面海拔 4 441 m。流域年平均气温约 2.9 °C,升温速率达 0.21 °C/10 a。年降水量约 426 mm。

乌兰乌拉湖(34°41'—34°55'N,90°14'—90°44'E)位于青海省格尔木市,北湖狭长,东湖和西湖面积相近(图 2c)。位于藏北区,是可可西里地区面积最大的湖泊。湖面海拔 4 854 m。冬春多大风,酷寒,气候恶劣,年降水量约 299 mm。

1.2 数据来源

1.2.1 Landsat 数据 湖泊影像采用 Landsat 卫星影像数据,数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)。采用 ENVI 5.3 软件处理,通过比选、镶嵌、拼接、裁剪、几何校正等工作处理。LandsatMSS、LandsatTM、ETM 以及 Landsat8 数据的分辨率均为 30 m。达到遥感解译要求,具体信息见表 1。

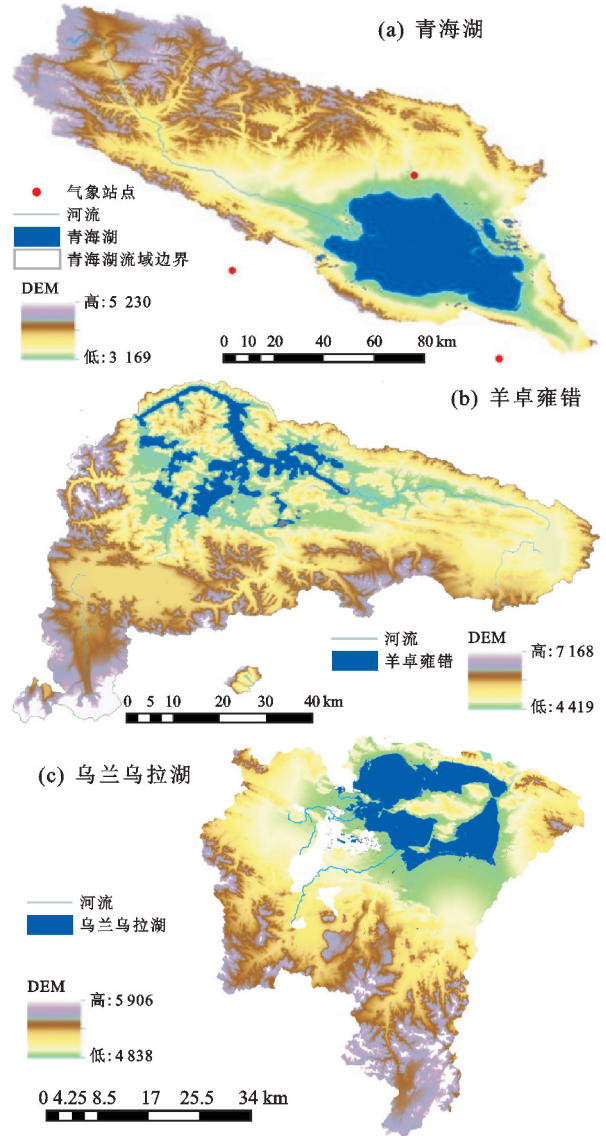


图 2 湖泊概况

Fig. 2 Overview of the lake

表 1 landsat 影像数据信息表

Table 1 Landsat series image data information used in the study

影像获取日期/(年-月-日)	卫星	云量/%	分辨率/m
1987-10-15;1992-11-16;1993-09-27	Landsat4-5 MSS 卫星数字产品	1.11;0.17;2.54	30
1994-10-21;1995-10-21;1996-09-19;2002-10-19; 2004-09-14;2005-09-15;2006-09-20	Landsat 7 TM C2 L2	1.33;0.98;0.98;0.15; 3.41;2.76;2.87	30
2003-09-02;2007-09-22;2009-09-11;2011-10-26; 2012-10-12;2013-10-09;2014-11-13;2015-10-31; 2016-10-01;2017-10-04;2018-10-23;2019-10-26; 2020-10-12;2021-11-09	Landsat8OLI_TIRS 卫星数字产品	0.15;0.16;1.55;4.01; 1.44;3.93;4.31;2.28; 4.20;5.40	30

1.2.2 Hydroweb 水位数据 湖泊水位测高数据来源于 Hydroweb(<https://hydroweb.theia-land.fr>), 该数据中心提供全球 150 余个主要河流、湖泊的水位、水量数据等水文数据产品。根据研究目标, 结合以往关

于高原湖泊的研究经验, 湖泊最稳定的时间为 10 月, 其次为 9 月和 11 月, 研究分别选取 3 个湖泊 1995—2019 年、1987—2021 年、1995—2021 年优先选取每年 10 月, 其次为 9 月或 11 月份的某日水位数据(表 2)。

表 2 湖泊水位信息

Table 2 Lake water level information

湖泊	获取水位时间/(年-月-日)
青海湖	1995-10-27;1996-10-11;1997-10-08;1998-10-14,1999-11-01;2000-10-04;2001-10-22;2002-10-17;2003-09-24; 2004-09-27;2005-10-01;2006-10-03;2007-10-03;2008-10-18;2009-10-07;2010-10-04;2011-10-04;2012-09-21; 2013-10-19;2014-10-09;2015-10-27;2016-10-27;2017-10-18;2018-10-27;2019-10-27;
羊卓雍错	1987-09-21;1988-09-09;1989-10-01;1990-10-21;1991-10-21;1992-10-21;1993-10-21;1994-10-23;1995-10-27; 1996-10-11;1997-10-08;1998-10-14,1999-11-01;2000-10-04;2001-10-22;2002-10-17;2003-09-24;2004-09-27; 2005-10-01;2006-10-03;2007-10-03;2008-10-18;2009-10-07;2010-10-04;2011-10-04;2012-09-21;2013-10-19; 2014-10-09;2015-10-27;2016-10-27;2017-10-18;2018-10-27;2019-10-27;2020-10-09;2021-10-01
乌兰乌拉湖	1995-11-27;1996-10-11;1997-10-08;1998-10-14,1999-11-01;2000-11-04;2001-10-22;2002-10-17;2003-09-24; 2004-09-27;2005-10-18;2006-10-03;2007-10-03;2008-10-18;2009-11-07;2010-10-04;2011-10-04;2012-09-21; 2013-10-19;2014-10-09;2015-10-27;2016-10-27;2017-10-18;2018-10-27;2019-10-27;2020-10-23;2021-10-21

1.2.3 气象数据 所用的气象数据为中国气象数据网中的“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”。研究使用 1970—2020 年青海湖附近的刚察站、祁连站, 羊卓雍错附近的浪卡子站和乌兰乌拉湖附近的格尔木站的气温、降水、日照时数日值数据(表 3)。

表 3 研究气象站

Table 3 Introduction to study meteorological stations

站名	站号	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m
刚察	52 754	100.08	37.20	3 301.5
祁连	52 657	100.25	38.10	2 788.2
浪卡子	55 681	90.40	28.90	4 433.7
格尔木	52 818	94.91	36.41	2 808.4

1.2.4 冰川数据 冰川数据来自全球陆地冰空间监测计划(global land ice measurements from space, GLIMS)发布的全球冰川数据(<http://www.glims.org/download/>)。该数据集的主要数据产品 GLIMS 冰川数据库包括对冰川几何、冰川面积、雪线、冰上湖泊等冰川属性的测量。

为补充说明湖泊动态变化的影响因素, 结合数据集中的冰川面积, 分析研究区范围内的冰川变化。在 3 个湖泊流域分别选取 3 个湖泊的起始年与终止年冰川面积数据来分析研究区范围内冰川融化对湖泊面积的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 水体指数法 针对湖泊边界信息的提取, 使用水体指数法提取水体。从数据可用性考虑, 在 Landsat 系列卫星数据中选择空间分辨率为 30 m 的 Landsat 系列卫星的 RGB 三波段合成产品, 由于遥

感影像易受到云层影响, 湖泊影像数据的选择都控制在 9 月、10 月或 11 月, 该时间段为湖泊最稳定的时间。采用水体指数 NDWI。计算公式为:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad (1)$$

式中: NIR、Green 分别对应近红外波段、绿波段。

1.3.2 湖泊水量变化计算 由于大多数湖泊缺乏详细的容积数据, 利用 TAUBE^[18] 提出的方法来计算湖泊水量变化。根据卫星提取的湖泊面积和水位数据建立统计模型估算湖泊蓄水量的变化, 假设湖泊为理想台体, 湖泊容积变化序列估算公式为:

$$\Delta V = (S1 + \sqrt{S1 \times S2} + S2) \times (h1 - h2) / 3 \quad (2)$$

式中: ΔV 为湖泊蓄水量的变化; $S1$ 为湖泊上表面面积, 对应湖泊高水位面积; $S2$ 为湖泊下表面面积, 对应湖泊低水位面积; $h1$ 和 $h2$ 是 2 个阶段的水位, 代表水位变化。

2 结果与分析

2.1 湖泊特征的时间变化规律

由图 3 可知, 青海湖、羊卓雍错、乌兰乌拉湖 1985—2021 逐年面积变化趋势。青海湖在 1987—2021 年湖泊面积先减后增, 1987 年湖泊面积为 4 385.44 km², 2021 年湖泊面积为 4 624.12 km², 研究时段内湖泊面积整体增长 238.68 km², 增长比例达到初始年份湖泊面积的 5.4%。具体来看, 从 2007 年为节点划分, 1987—2007 年湖泊面积减少 136.09 km², 自 2007—2020 年, 湖泊面积增加 365.52 km², 在 $p < 0.05$ 的置信水平上显著增加, R^2 为 0.96。

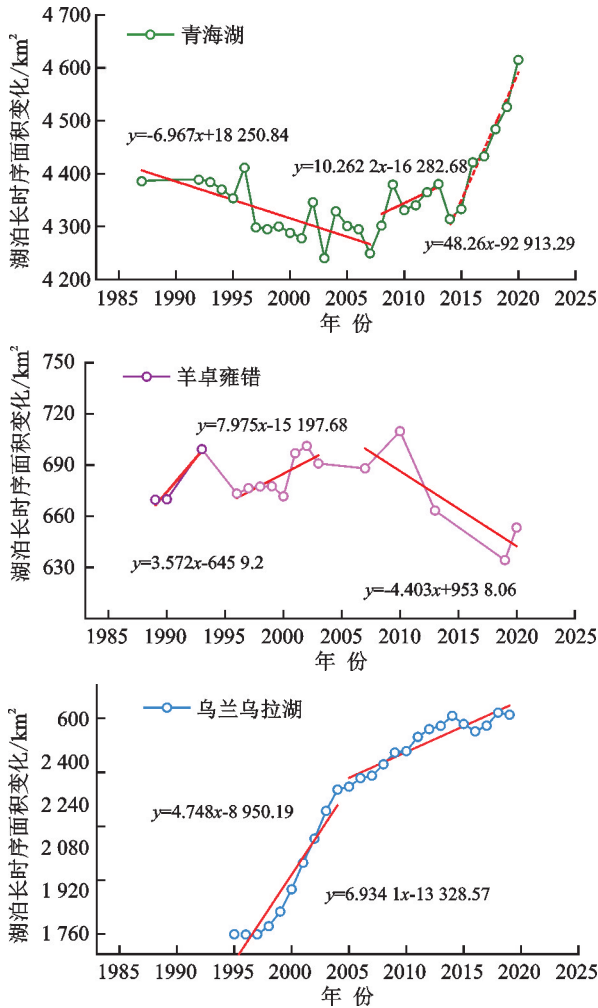


图 3 1985—2021 年 3 个湖泊面积变化

Fig. 3 Changes in the area of the three lakes from 1985 to 2021

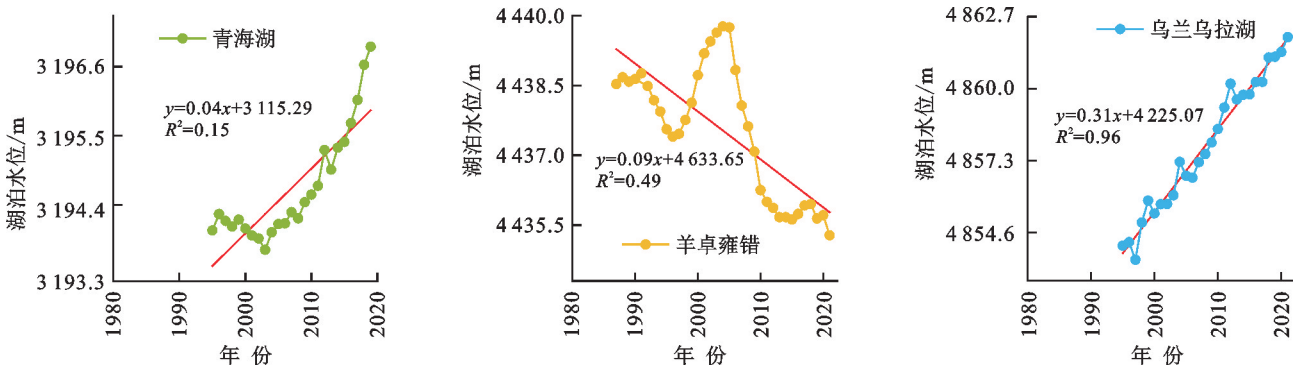


图 4 1985—2021 年 3 个湖泊水位变化

Fig. 4 Water level changes in three lakes from 1985 to 2021

根据湖泊水量变化计算公式,湖泊逐年的水量变化见图 5。青海湖水量在研究时段内增加,2010—2020 年水量累计变化由 1995—2005 的损耗状态转为为盈。第 1 阶段(1995—2007 年)水量表现为下降趋势,水量损耗 1.89 gt,下降速率为 -0.32 gt/a ;第 2 阶段(2007—2020 年)水量由损耗转为增长,期间水量共增长 16.51 gt,上升速率 1.03 gt/a 。羊湖蓄水量

羊卓雍错 1987—2021 年湖泊面积先增后减,1989 年面积为 669.56 km^2 ,到 2020 年湖泊面积为 653.24 km^2 ,研究时段内整体缩小 16.31 km^2 。萎缩比例达到初始湖泊面积的 2.43%。具体来看,1987—2007 年湖泊面积增长 18.43 km^2 ,2007—2021 年,湖泊面积持续缩减 34.75 km^2 ,此时间段缩减的面积是整体缩减面积的 2 倍多。

乌兰乌拉湖在 1987—2021 年湖泊面积持续增加,1991 年湖泊面积为 516.52 km^2 ,2017 年为 642.10 km^2 ,研究时段内湖泊面积整体增长 125.57 km^2 ,在 $p < 0.05$ 的置信水平上显著增加,增长比例达到初始年份湖泊面积的 24.3%。同样以 2007 年为时间节点,1991—2007 年湖泊面积增加 62.37 km^2 ,2007—2019 年湖泊面积增加 63.20 km^2 。总体来看,3 个湖泊的面积变化关键时间节点为 2007 年。

由图 4 可知,青海湖水位变化呈先减后增趋势,自 2007 年以后呈显著增加趋势。从水位上的变化来看,水位总体增长 1.32 m 。具体来看,1987—2007 年湖泊水位下降 1.22 m ,2007—2021 年水位增加 1.69 m 。羊卓雍错湖水位同样与面积具有较强的一致性,先增后减,1987—2007 年水位上升 0.30 m 。且 2007 年水位最高,2007 年至 2019 年水位下降 2.79 m ,研究时段内水位共下降 3.25 m 。乌兰乌拉湖水位持续上升,研究时段内水位上升 8.12 m 。在 $p < 0.05$ 置信水平上呈显著的上升趋势($R^2 = 0.96$)。

累计变化先增后减,自 2005 年以后,水量仍比上年增长,但总体的累计变化量呈下降趋势。乌兰乌拉湖水量收支状况处于逐年爬升状态且水量大,研究时段内水量累计增长 27.05 gt 。

2.2 湖泊特征的空间变化规律

湖泊在空间上的变化主要体现为湖泊面积的变化,湖泊面积通过 Landsat 数据处理及湖泊边界提取

来获取,由于研究时间跨度较大,将显著年的面积叠加,可更加清晰直观的观测到 3 个湖泊的空间动态变化趋势。

由图 6 可知,1987—2021 年青海湖面积空间变化呈由东南向西北扩张趋势,湖岸线由湖内部向陆地迁移;羊卓雍错面积变化在空间范围上呈现萎缩趋势,东部嘎马林曲入口附近退缩程度最大,达到 1.73 km;乌兰乌拉湖面积的主要湖泊扩张区域集中在南部,主要是因为南部的地势较缓,是河流冲积扇地带,水深较浅,在湖泊补给水量充足的年份,湖泊水域边界容易发生南移。

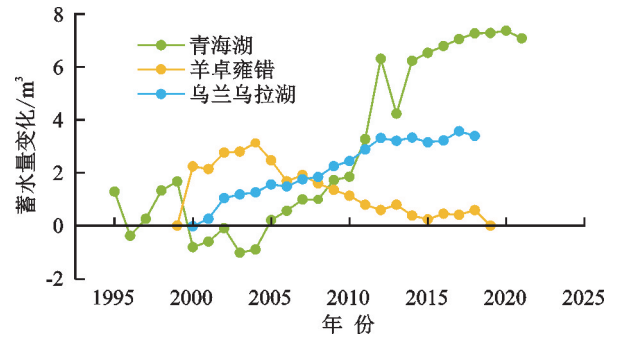


图 5 1995—2021 年 3 个湖泊蓄水量逐年累计变化
Fig. 5 Annual cumulative changes of lake water storage from 1995 to 2021

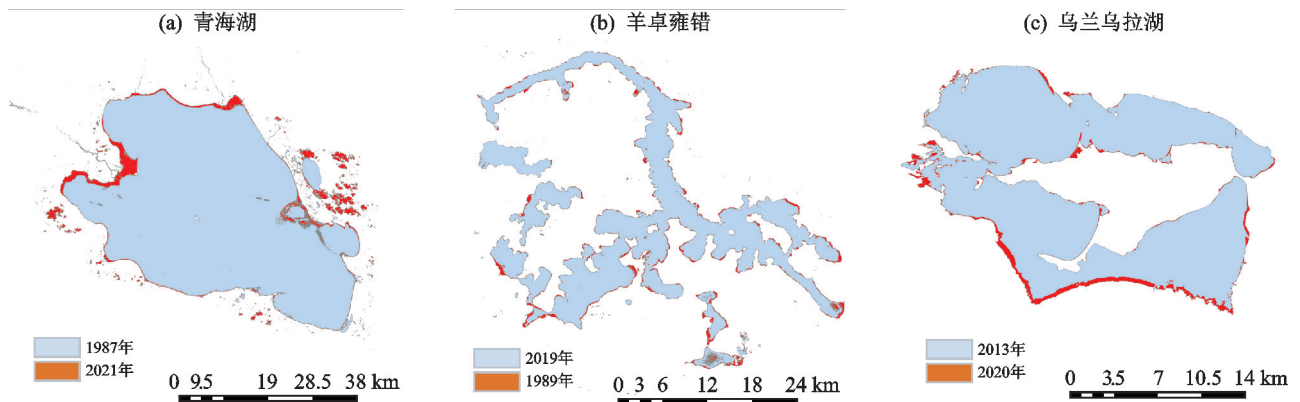


图 6 湖泊面积动态变化及主要区域示意

Fig. 6 Dynamic changes of Qinghai Lake area and schematic map of main areas

2.3 关键影响因素归因分析

青藏高原的气候特征主要以低温和强烈的太阳辐射为主,降水呈现明显的季节性,主要集中在 6—9 月,约占年度总量的 60%~90%。以往研究^[19]表明,青藏高原气候向暖湿、暖干 2 个方向发展,其中,南部地区主要呈暖湿变化,具有气温升高、降水增加的特点。湖泊面积变化与区域气象要素具有显著的区域相关性。由此根据区域分布的不同,从气温、降水量 2 种主要气候因子以及冰川融水、冻土融化的角度来探讨影响 3 个湖泊变化的关键驱动因子。

2.3.1 气温和降雨因子的年际变化特征 青海湖流域位于祁连—青海湖区,地理位置独特,气候类型为高原大陆性气候,日照时间长且强烈,昼夜温差较大,降水偏少,气候特征有一定的季节差异。春季多大风和沙暴,夏季和秋季凉爽但较为短暂,冬季寒冷干燥。2007 年以后湖泊面积增加阶段的年份,降雨增加,气温升高(图 7a)。

羊卓雍措流域位于藏南区,1971—2007 年年平均气温大约在 2.9 °C 左右,年平均气温变化曲线呈上升趋势,升温速率达 0.21 °C/10 a。气温在 2006 年后波动较明显(图 7b),在湖泊面积减少阶段的年份降水明显下降,气温逐年爬升。

乌兰乌拉湖位于藏北区,年平均气温在摄氏零度以上,最高可达到 15 °C 以上,年均降雨量为 100~200 mm。湖泊面积增加,降水减少,气温升高(图 7c)。由图 7 可知,3 个湖泊面积变化都在 2007 年发生转折。青海湖和羊卓雍错的变化较为明显,驱动因素考虑到与同期的降水、气温因素有关。青海湖气温与降水在 2007 年上升速率同时升高,羊卓雍错同样在 2007 年之后截止 2020 年日平均降水量 < 0.5 mm,远不同于 2003—2007 年期间日平均降水量保持在 1~1.5 mm 的水平之间,气温也在 2007 年之后大幅升高。

2.3.2 湖泊变化的关键气候因子归因分析 对湖泊面积、水位、水量与气象因子进行 pearson 相关性检验(图 8),青海湖面积与降水量 $p < 0.05$ 的置信水平下呈显著正相关(0.77),湖泊面积变化主要受到降水量的影响,与气温在 $p < 0.05$ 的置信水平下呈弱相关趋势(0.19),说明湖泊变化受到气温的一定影响。近 15 年来,青海湖流域平均气温呈明显增加趋势,2007 年以来,气候呈较湿润状态,降水量 ≥ 1 mm 日数是影响青海湖面积与水位变化的关键影响因素,使青海湖湖泊面积扩大、水位上升。湖泊水位与气温的相关系数为 0.16,两者长时间序列的变化具有一致性,说明湖泊水位的变化也受气温的一定影响。

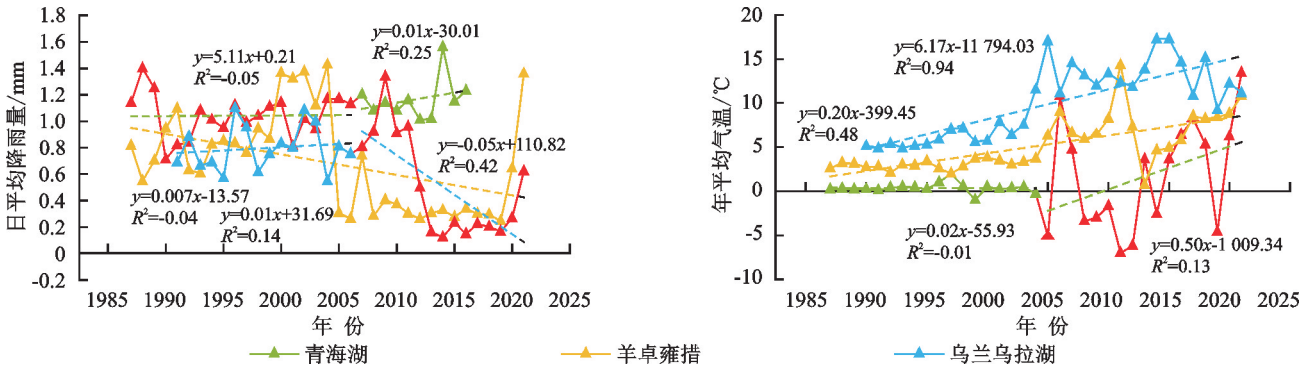


图 7 湖泊面积、降雨和温度的年际变化规律

Fig. 7 Interannual variation of lake area, rainfall and temperature

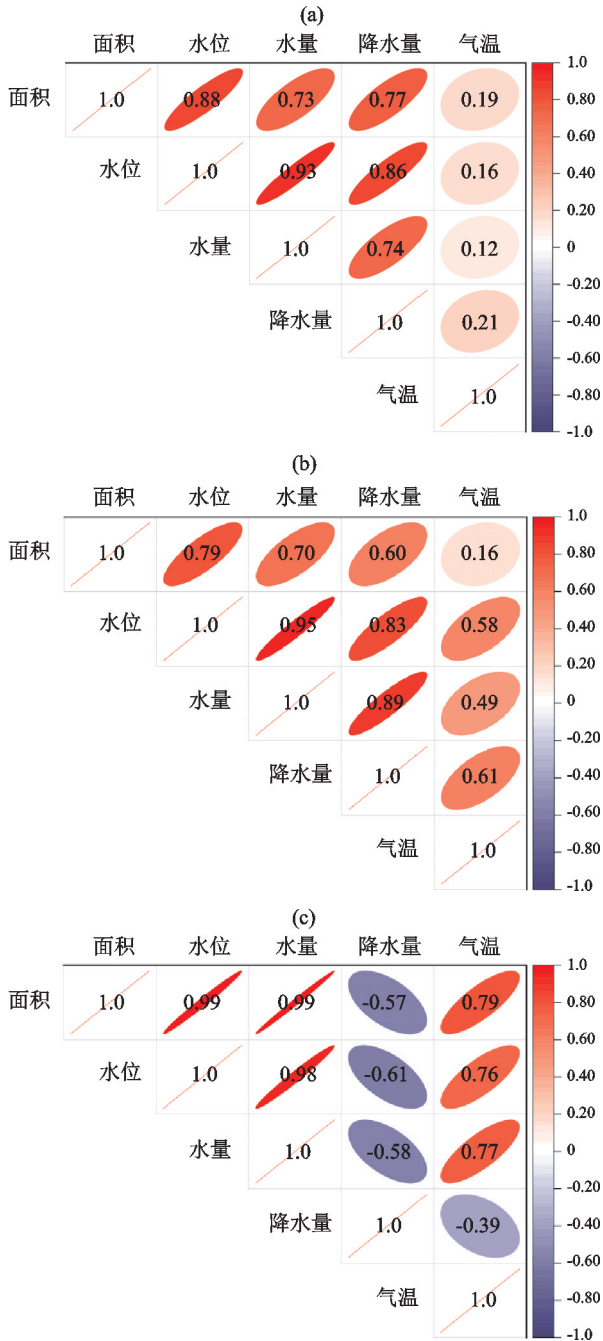


图 8 3 个湖泊面积、水位水量与气象因子的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficient plot of area, water level and meteorological factors

羊卓雍错湖泊变化与降水量呈显著正相关(相关系数分别为 0.60, 0.83, 0.89), 表明降水变化是羊湖面积变化的显著原因。降水减少, 气温升高, 面积减少, 水位下降; 由此认为, 降水量增加、气温逐年升高导致蒸发量增加, 进而湖泊水量减少而引起湖泊面积的萎缩和水位进一步下降。萎缩态势基本反映藏南区半干旱季风气候区以降水补给为主的高原内陆湖泊对气候变化的响应。

乌兰乌拉湖湖泊面积与气温在 0.05 的置信水平下呈显著正相关(0.79), 说明湖泊变化受气温直接影响。湖泊面积与降水量呈负相关(-0.57)。气温升高导致的蒸发量加剧, 并没有使湖泊面积、水位和水量萎缩降低, 流域内冰川分布面积和数量较少, 气温升高也并不使冰川融化的形成的径流对湖泊水量造成太多的影响, 湖泊面积反而剧烈增加, 表明乌兰乌拉湖的水文变化与气温升高导致的冻土融化因素有直接关系。湖面降水量通过地表径流的直接补给是一个重要来源, 但不是该湖的最主要补给水源。

3 讨论

3.1 湖泊冰川区面积变化

影响湖泊变化的因素有很多, 青藏高原湖泊变化不仅受制于降水的补给, 也与冰川联系密切。青藏高原气候干燥, 大多数湖泊的湖面扩张与流域内的冰雪融水密切相关^[20]。为充分说明影响湖泊变化的因素, 在全球冰川数据 (<http://www.glims.org/download/>) 中分别选取 3 个湖泊起始年和终止年的冰川面积来补充说明冰川变化对湖泊水文特征变化的影响。

青海湖流域内冰川面积由研究初期的 136.76 km² 缩减到 75.97 km², 冰川面积减少 60.79 km², 减少速率为 1.68 km²/a, 西北部的高山冰川持续融化, 导致近年来入湖流量的增加。与青海湖西北部的扩张形成响应关系。羊卓雍错 1989 年冰川面积为 308.12 km², 截止 2021 年, 冰川面积为 262.66 km², 共缩小 45.46 km²。流域气温的显著上升促使冰川

的消融加剧,冰川消融进一步湖泊的冰川融水补给,造成湖泊扩张,但是羊卓雍错流域冰川面积约占流域面积的 2.01%,流域内的冰川融水占湖泊补给的份额较小(16.13%)^[21],所以,冰川消融对于湖泊的扩张贡献较小。乌兰乌拉湖流域内的冰川分布面积小,1985 年冰川面积为 50.18km²,2021 年面积为 48.77km²,数量不多,共有 17 条冰川,冰川面积仅为流域面积的 0.37%,地势平坦,冰雪融水造成入湖径流的比例很小,且 1985—2021 年间冰川面积缩小 1.41 km²,变化速率仅为 0.04 km²/a,对湖泊变化的影响几乎可忽略,所以不做更多的讨论。总体来看,湖泊水量变化较流域内冰川面积退化的变化一致,也与青海湖西北部汇流处的湖泊面积增加相一致,尤其是 2008 年以来,湖泊面积、水量的变化差异,说明冰川

退缩是湖泊水量的重要的补给源,对湖泊的扩张具有一定贡献,但由于冰川同时受气温、降水量变化的影响,对于冰川融水占湖泊水量增加量的具体比例仍有待后续的定量分析研究。

3.2 湖泊冻土区分布现状

除冰川影响外,影响湖泊水文特征的因素还有流域冻土深度变浅、季节冻结时间缩短等。青海湖流域内的冻土主要分布在西北部的高寒区(图 10a),活动层土壤温度逐年升高,2011—2018 年升高 1.39℃,来自冻土的季节融化使青海湖西北部的湖面在冰川与冻土的共同作用下呈明显扩张趋势。羊卓雍错冻土区主要分布在西部,活动层土壤温度由 2006 年的-9.52℃升高至 2021 年的-8.50℃,说明羊卓雍错湖泊变化也一定程度受到冻土的季节融化影响(图 10b)。

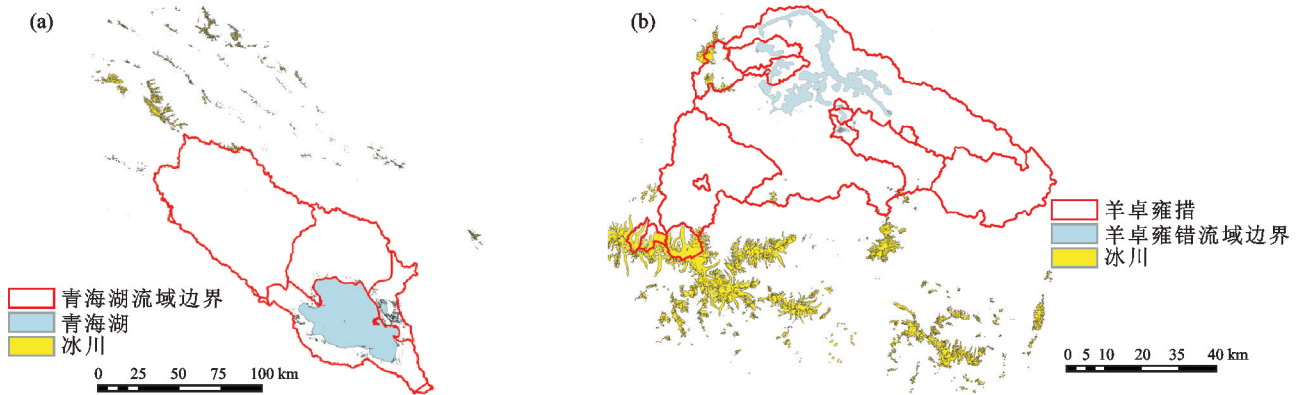


图 9 流域内冰川分布现状

Fig. 9 Distribution of glaciers in the basin

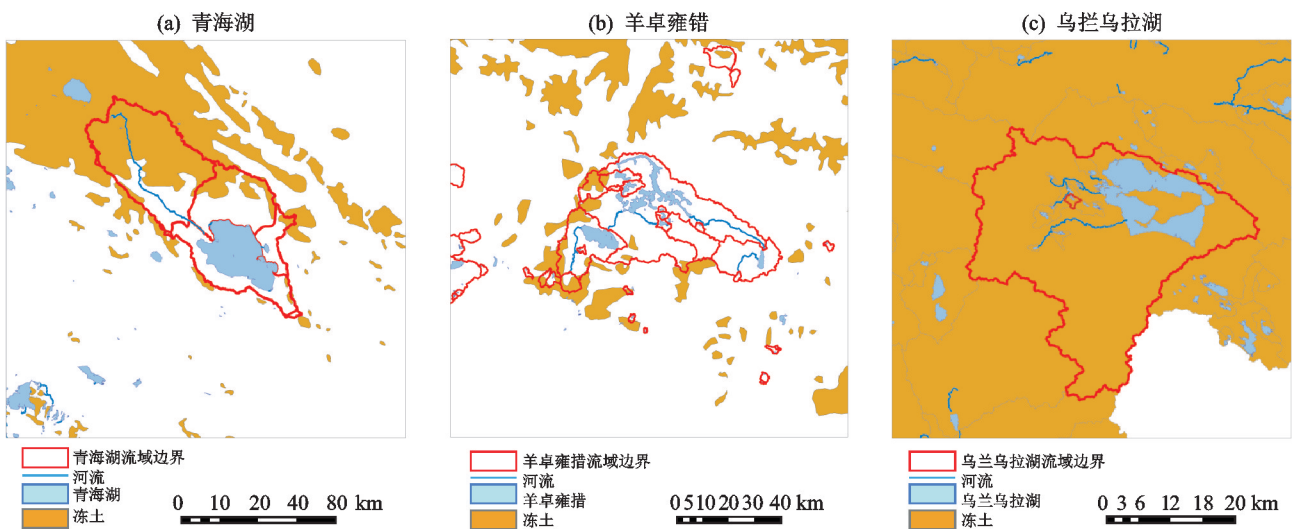


图 10 流域内冻土分布现状

Fig. 10 Distribution of frozen soil in the river basin

尝试分析乌兰乌拉湖湖泊面积、水位与水量持续增加的补给构成及变化原因,但在气候因素方面的分析无法准确说明气候因子对湖泊变化的影响,湖泊面积与气温在 $p < 0.05$ 置信水平下呈显著正相关(0.79),说明气温升高引起的冻土活动层土壤温度升

高对湖泊变化起到十分重要的贡献,如青海湖 10 cm 处活动层土壤温度从 2011 年的-8.59℃升高到 2018 年的-7.20℃,羊卓雍错 50cm 处从 2006 年的-9.52℃升高到-8.50℃。乌兰乌拉湖附近几乎没有冰川分布,气温升高所导致的冰雪融水造成入湖径

流的比例很小。李韧等^[22]研究表明,1981—2010年,青藏公路沿线多年冻土区活动层厚度呈明显增大趋势。20世纪80年代,冻土活动层平均厚度为179 cm,90年代活动层厚度比80年代增加14 cm;21世纪前10年,冻土活动层厚度则比20世纪90年代增大19 cm;同时,年气温也相应地分别升高0.5和1.1℃,年平均气温与冻土活动层的相关系数达到0.66($p < 0.01$)。由此可考虑面积扩张和水位上升因素主要来自冻土的季节融化,位于可可西里中部的湖泊地理位置决定其受冻土的影响最大,本区分布着多年连续冻土(图10c),冻土面积占总面积90%左右。自20世纪90年代以来,多年冻土趋于不稳定,表现为活动层土壤温度增加,文中讨论的乌兰乌拉湖活动层土壤温度由2004年-10.50℃升高至2014年的-9.43℃^[7],与本文中90年代以来湖泊面积显著增加和水位上升相符合,年平均气温也相应地升高6.1℃。乌兰乌拉湖流域内活动层土壤水分持续增加(图11),覆盖于多年冻土之上夏季融化冬季冻结的土层,其中,水分逐年增加与湖泊面积增加或许具有一定联系,冻土活动层土壤温度随气温升高而升高,使得冻土层的融化深度加大,释放水量部分补给地下水,通过径流补给湖泊,从而使得入湖水量增加,湖泊水域面积扩大,造成湖泊面积、水位、蓄水量变化均与气温呈显著正相关。虽然,冻土变化释放的水量对湖泊的补给量尚不可知,但冻土融化对湖泊的扩张应有重要影响。当然,冻土融化对湖泊的补给过程比较复杂,需要更多的研究进行进一步探讨。

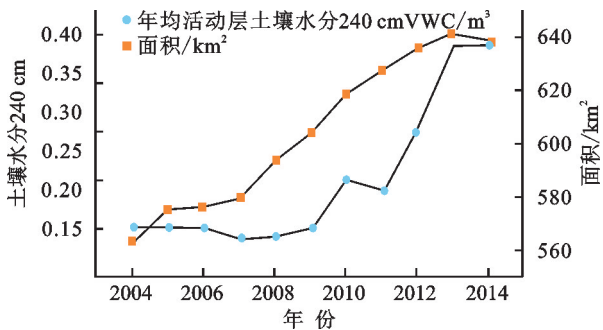


图11 乌兰乌拉湖流域内活动层土壤水分含水量

Fig. 11 Soil moisture content of the active layer in the Ulan-Ula Lake basin

4 结论

(1)湖泊面积水位时间变化方面,1987—2021年湖泊面积与水位变化具有一致性,青海湖面积、水位先减后增,羊卓雍错湖泊面积、水位先增后减,乌兰乌拉湖湖泊面积、水位呈显著上升趋势。3个湖泊水文特征变化的转折年为2007年,驱动因素主要为降水在2007年显著增加,高原气温升高。

(2)湖泊空间变化方面,青海湖面积空间变化由

东南向西北扩张趋势。羊卓雍错面积空间变化呈萎缩趋势。乌兰乌拉湖面积的主要湖泊扩张区域集中在南部,主要是因为南部的地势较缓,是河流冲积扇地带,水深较浅,湖泊水域边界容易发生南移。

(3)通过对1985—2021年青海湖、羊卓雍错、乌兰乌拉湖气候(降水量、气温)、水文因素分析(冰川、冻土)发现,青海湖变化的关键影响因素是降水量变化,且面积和降水量具有滞后性;羊湖面积变化的显著原因同样是降水量变化,同时,气温逐年上升使得蒸发量加大,进而通过湖泊水量减少而引起湖泊面积萎缩和水位下降进一步加剧。乌兰乌拉湖湖泊面积与气温呈极显著相关(0.79),湖泊变化受气温直接影响。面积、水位与水量上升因素主要是气温显著升高导致的来自冻土的季节融化。

参考文献:

- [1] 詹鹏飞,刘凯,张玉超,等.青藏高原不同气候子区典型湖泊多时间尺度变化的遥感对比研究[J].遥感技术与应用,2021,36(1):90-102.
ZHAN P F, LIU K, ZHANG Y C, et al. A comparative study on the changes of typical lakes in different climate zones of the Tibetan Plateau at multi-timescales based on remote sensing observations[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 90-102.
- [2] 袁烽迪,张溪,魏永强.青藏高原生态屏障区生态环境脆弱性评价研究[J].地理空间信息,2018,16(4):67-69,10.
YUAN F D, ZHANG X, WEI Y Q. Evaluation of ecological environment vulnerability in the Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier zone[J]. Geospatial Information, 2018, 16(4): 67-69, 10.
- [3] SU Z, SHI Y F, ZHENG B X. Quaternary glacier monuments and ice age division of Gongga Mountain[J]. Advances in Earth Science, 2002(5): 639-647.
- [4] 姚檀栋,朱立平.青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J].地球科学进展,2006,21(5):459-464.
YAO T D, ZHU L P. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 459-464.
- [5] ZHANG G Q, LUO W, CHEN W F, et al. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 2019, 64(18): 1306-1309.
- [6] 陈军,刘延昭,曹立国,等.青藏高原湖泊变化遥感监测及水量平衡定量估算研究进展[J].冰川冻土,2022,44(4):1203-1215.
CHEN J, LIU Y Z, CAO L G, et al. A review on the research of remote sensing monitoring of lake changes and quantitative estimation of lake water balance in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(4): 1203-1215.

- [7] 张国庆. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(2): 214-223.
ZHANG G Q. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations[J]. Progress in Geography, 2018, 37(2): 214-223.
- [8] 孟庆伟. 青藏高原特大型湖泊遥感分析及其环境意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2007.
MENG Q W. Remote sensing analysis of the large lakes in the Tibetan Plateau and its environmental significance [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2007.
- [9] 武慧智, 姜琦刚, 程彬. 基于 RS 和 GIS 技术青藏高原湖泊动态变化研究[J]. 世界地质, 2007, 26(1): 66-70.
WU H Z, JIANG Q G, CHENG B. Study of dynamic changes of lakes in Qinghai-Tibet Plateau based on remote sensing and GIS[J]. Global Geology, 2007, 26(1): 66-70.
- [10] 董斯扬, 薛娴, 尤全刚, 等. 近 40 年青藏高原湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 535-544.
DONG S Y, XUE X, YOU Q G, et al. Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(4): 535-544.
- [11] 王文种, 黄对, 刘九夫, 等. 基于 Landsat 与 Sentinel-3A 卫星数据的当惹雍错 1988—2018 年湖泊水位—水量变化及归因[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1552-1563.
WANG W Z, HUANG D, LIU J F, et al. Patterns and causes of changes in water level and volume in Tangra Yumco from 1988 to 2018 based on Landsat images and Sentinel-3A synthetic aperture radar[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1552-1563.
- [12] 郭丰杰, 李婷, 季民. 2000—2019 年青海湖面积时序特征分析及预测[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 740-748.
GUO F J, LI T, JI M, et al. Time series analysis and prediction of Qinghai Lake area from 2000 to 2019[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 740-748.
- [13] 闰利, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000 年以来青藏高原湖泊面积变化与气候要素的响应关系[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 573-589.
LÜ L, ZHANG T B, YI G H, et al. Changes of lake areas and its response to the climatic factors in Tibetan Plateau since 2000[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 573-589.
- [14] 朱立平, 鞠建廷, 乔宝晋, 等. “亚洲水塔”的近期湖泊变化及气候响应: 进展、问题与展望[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2796-2806.
ZHU L P, JU J T, QIAO B J, et al. Recent lake changes of the Asia Water Tower and their climate response: Progress, problems and prospects [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2796-2806.
- [15] 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.
ZHU L P, XIE M P, WU Y H. Quantitative analysis of lake area change and its causes in Namco, Tibet from 1971 to 2004[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(18): 1789-1798.
- [16] 李晟铭, 刘吉平, 刘阁, 等. 三个时期青藏高原冰川补给型湖泊的变化[J]. 湿地科学, 2018, 16(2): 130-137.
LI S M, LIU J P, LIU G, et al. Changes of glacier-fed lakes in Tibetan Plateau for three periods [J]. Wetland Science, 2018, 16(2): 130-137.
- [17] 朱立平, 彭萍, 张国庆, 等. 全球变化下青藏高原湖泊在地表水循环中的作用[J]. 湖泊科学, 2020, 32(3): 597-608.
ZHU L P, PENG P, ZHANG G Q, et al. The role of Tibetan Plateau Lakes in surface water cycle under global changes [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(3): 597-608.
- [18] 张洪源, 吴艳红, 刘衍君, 等. 近 20 年青海湖水量变化遥感分析[J]. 地理科学进展, 2018, 37(6): 823-832.
ZHANG H Y, WU Y H, LIU E, et al. Water storage variation of the Qinghai Lake in recent decades based on satellite observation [J]. Progress in Geography, 2018, 37(6): 823-832.
- [19] 谭春萍, 杨建平, 米睿. 1971—2007 年青藏高原南部气候变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1111-1120.
TAN C P, YANG J P, MI R. Analysis of the climatic change characteristics in the southern Tibetan Plateau from 1971 to 2007 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6): 1111-1120.
- [20] 赵永利. 西藏羊卓雍错流域冰川-湖泊动态变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(8): 88-93.
ZHAO Y L. Dynamic variations of glaciers-lake in Yamzho Yumco Basin of Tibet [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(8): 88-93.
- [21] 除多, 普穷, 拉巴卓玛, 等. 近 40a 西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2012, 24(3): 494-502.
CHU D, PU Q, L B Z M, et al. Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40 a. [J]. Lake Sci. 2012, 24(3): 494-502.
- [22] 李韧, 赵林, 丁永建, 等. 青藏公路沿线多年冻土区活动层动态变化及区域差异特征[J]. 科学通报, 2012, 57(30): 2864-2871.
LI R, ZHAO L, DING Y J, et al. Dynamic change and regional difference characteristics of active layer in permafrost region along Qinghai-Tibet highway [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(30): 2864-2871.