

2000—2020年青海省冰川和湖泊演化特征

张 聪¹, 姚晓军¹, 肖建设², 张鸿芳¹, 王 玉¹, 薛 娇¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001)

摘要: 冰川和湖泊是气候变化的敏感指示器, 研究其动态变化对揭示全球气候变化具有重要意义。基于 Landsat TM/ETM+/OLI 和 Sentinel 2A/2B MSI 遥感影像提取青海省冰川和湖泊信息, 并对其近 20 年动态变化特征及其影响进行分析。结果表明: 2020 年青海省冰川数量、面积和冰储量分别为 3713 条、3643.40 km² 和 259.63 km³, 面积≥1 km² 的湖泊数量和面积分别为 231 个和 14374.56 km²; 2000—2020 年青海省冰川数量、面积和冰储量分别减少 128 条、464.63 km² (−0.60%/a) 和 29.58 km³ (−0.54%/a), 面积≥1 km² 的湖泊数量和面积分别增加 27 个和 2220.09 km² (0.84%/a); 青海省境内冰川自西向东呈加快减少趋势, 气温上升是主要影响因素; 除柴达木盆地中部和北部、唐古拉山北侧等区域外, 青海省大部分区域的湖泊水域面积呈增加趋势, 气候暖湿化和冰川融水增多是主要影响因素, 但个别湖泊演化受人类活动影响显著; 部分湖泊扩张已对湖周草场和道路等基础设施构成直接威胁, 未来应加强对变化迅速的湖泊监测, 并及时制订相应的防灾减灾措施。

关键词: 冰川; 湖泊; 气候变化; 青海省

联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 最新发布的评估报告显示, 未来全球气候变化都将加剧, 具体表现为海陆表面温度上升速度持续加快、海平面上升、多年冻土和季节性积雪融化、冰川消融以及极端天气事件频发等^[1]。其中, 1901—2020 年亚洲和中国的陆地表面平均温度均呈现较为明显的上升趋势, 分别为 0.14 °C/10 a 和 0.15 °C/10 a^[2]。由于地理位置、经济发展水平和社会保障体系等因素的限制, 气候变化的影响呈现出明显的地域性特征, 因此认识气候变化背景下不同自然要素的响应规律及其对人类生产生活的潜在影响成为亟待解决的科学问题。

冰川和湖泊被视作气候变化的敏感指示器, 对自然环境和社会经济发展具有重要影响^[3-5]。作为冰冻圈的重要组成部分, 冰川对气候变化极为敏感, 其融水一方面通过补给河川径流起着“削峰填谷”作用, 另一方面是区域社会发展的重要水资源, 对于干旱半干旱地区尤为重要, 素有“固体水库”之称。同时, 冰川变化导致的冰崩、冰川洪水及冰湖溃决洪水等自然灾害亦对当地居民和下游基础设施造成严重威胁^[3,6-9]。湖泊是全球环境变化的敏感区域, 作为大气圈、生物圈、岩石圈和陆地水圈相互作用的连接点, 其形成与消失、扩张与收缩以及由此引起的生态环境演化过程是全球性或区域性气候变

收稿日期: 2021-11-01; 修订日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071089, 42161027); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目; 西北师范大学研究生科研资助项目 (2021KYZZ01040)

作者简介: 张聪 (1995-), 男, 甘肃甘谷人, 博士研究生, 研究方向为冰冻圈变化。

E-mail: zc1549350717@163.com

通讯作者: 姚晓军 (1980-), 男, 山西夏县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为地理信息技术与冰冻圈变化。E-mail: xj_yao@nwnu.edu.cn

化共同作用的结果^[5]。

青藏高原具有“世界屋脊”之称,其面积约 $254.22 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均海拔在4000 m以上,发育着数量众多的冰川和湖泊,被誉为“第三极”和“亚洲水塔”^[10,11]。据统计,青藏高原共有冰川36800条,面积和冰储量分别为 49873 km^2 和 4561 km^3 ^[12];面积 $\geq 1 \text{ km}^2$ 的湖泊数量和面积分别为1091个和 $4.50 \times 10^4 \text{ km}^2$,其面积约占全国湖泊总面积的51.4%^[13]。1961—2020年青藏高原的升温速率高达 $0.36 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,约为全球升温速率的2倍^[2],其气候背景和生态环境均发生显著变化^[14]。气候变化引起的冰川和湖泊变化不但直接影响了周边地区人口的生存和发展,而且具有导致区域性乃至北半球大气环流变迁的可能性^[15,16]。青海省位于青藏高原东北部,属大陆性干旱半干旱高原气候,境内冰川和湖泊资源丰富。在全球气候变暖背景下,尤其受气候暖湿化作用的影响,青海省大多冰川呈现减薄退缩态势,冰川融水径流增加引发的反馈作用日益凸显;湖泊水位上升和湖面扩张直接对湖区周围草场及基础设施构成威胁^[17-20]。2021年6月7-9日,习近平总书记赴青海考察并发表重要讲话,7月30日通过并开始实施的《加快把青藏高原打造成为全国乃至国际生态文明高地的行动方案》均突显出青海省在中国生态文明建设中的重要地位。由于不同学者使用的数据源、研究时段和地理范围均存在差异,冰川和湖泊的变化研究主要集中在山系^[21-25]、流域^[26]和青藏高原^[27-29]等空间尺度,而对于青海省的冰川和湖泊变化及其区域分异规律尚缺乏认识。本文基于Landsat TM/ETM+/OLI和Sentinel 2A/2B MSI遥感影像,构建2000年和2020年青海省冰川和湖泊数据集,并对其分布规律及时空变化特征进行分析,以期全面认识青海省在气候变暖背景下冰川和湖泊的响应规律、区域水资源的合理利用和防灾减灾提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

青海省($31^\circ 39' \sim 39^\circ 19' \text{N}$, $89^\circ 35' \sim 103^\circ 04' \text{E}$)地处中国西北部和青藏高原东北部,北部和东部与甘肃省相接,西北部与新疆维吾尔自治区相邻,南部和东南部与四川省毗连,西南部与西藏自治区接壤(图1)。东西长约1200 km,南北宽约800 km,面积为 $72.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。青海省地处中国地势第一阶梯,平均海拔在3000 m以上,总体呈现由东北和西北向西南逐渐升高趋势,祁连山—阿尔金山、昆仑山—阿尼玛卿山和唐古拉山三大近东西走向的山系构成了青海省地形的基本骨架,河谷和盆地相间分布。因深居高原内陆,青海省属典型大陆性高原气候,具有日照时间长、辐射强烈、雨热同期以及年温差较小而日温差较大等特征。受地形和海陆位置影响,柴达木盆地和东部地区年均温较高,年降水量基本呈现从东南向西北递减趋势。

青海省境内现代冰川普遍发育,主要分布在昆仑山、唐古拉山、祁连山、阿尔金山和阿尼玛卿山等高海拔地区。根据中国第二次冰川编目,青海省共有冰川3802条,面积 3935.81 km^2 ,冰川资源总量仅次于西藏自治区和新疆维吾尔自治区,位居全国第三^[30]。作为长江、黄河和澜沧江的发源地,青海省素有“江河源”之称,境内多年平均径流量较大($500 \times 10^8 \text{ m}^3$)。科技部科技基础性工作专项“中国湖泊水质、水量与生物资源调查”数据显示,2005—2006年青海省面积 $\geq 1 \text{ km}^2$ 湖泊的数量和面积分别为222个和 13214.90 km^2 ,湖泊面积仅次于西藏自治区,约占全国湖泊总面积的16.20%^[13]。

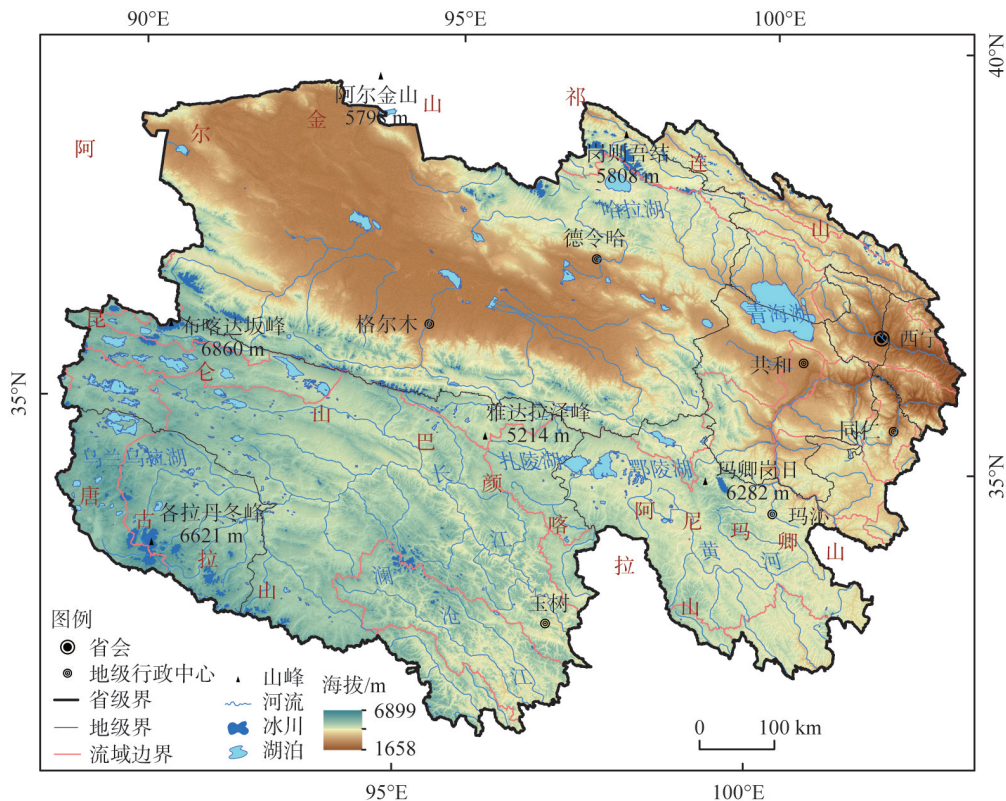


图1 青海省及其冰川湖泊分布

Fig. 1 Qinghai province and distribution of glaciers and lakes

1.2 数据来源

遥感数据源包括 Landsat TM/ETM+/OLI 影像和 Sentinel 2A/2B MSI 影像, 用于解译青海省冰川和湖泊轮廓, 前者共 104 景, 其中, 2000 年的 Landsat TM 和 ETM+ 影像分别为 68 景和 10 景, 2020 年的 Landsat OLI 影像 26 景, 多集中在 6-8 月; 后者共 84 景, 其中, 2020 年 Sentinel 2A MSI 影像 32 景, 2020 年 Sentinel 2B MSI 影像 52 景, 多集中在 9-10 月。所选用的 Landsat TM/ETM+/OLI 影像从美国地质调查局网站 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 下载获得, 质量均为 Level-1 级, 即经过辐射校正、几何校正和地形校正等预处理。为提高影像空间分辨率并保留其多光谱信息, 对 Landsat ETM+ 和 OLI 影像的可见光波段与全色波段进行了融合, 融合后的影像空间分辨率为 15 m。Sentinel 2A/2B MSI 影像从哥白尼开放获取中心 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) 下载获得, 均经过正射校正、几何精校正和大气校正等预处理, 所选用的波段空间分辨率为 10 m。

为提取研究区冰川和湖泊地形信息, 选用的数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 为 SRTM DEM 数据, 从地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 下载获得, 空间分辨率为 30 m, 在 90% 置信区间内其垂直精度优于 16 m, 平坦区域的高程精度可达 10 m^[31]。同时, 从国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>) 下载获得研究区地面气温和降水月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集 (V2.0), 该数据集基于全国国家级台站资料并利用 GTOPO30 DEM 进行空间插值生成, 用于分析 2000—2020 年青海省冰川和湖泊分布区气候变化趋势。

1.3 研究方法

1.3.1 冰川信息提取及精度验证

本文选用冰川边界自动化提取方法^[32-34]对面积 $\geq 0.01 \text{ km}^2$ 的冰川进行提取(图2)。首先采用波段比值法(R/SWIR)并通过人工交互方法确定阈值,对经阈值分割后的二值图像进行中值滤波处理,结合形态学开闭运算方法将其转换为矢量多边形,然后参考Google Earth和冰川编目资料对冰川矢量边界进行人工修订和数据质量检查,保证冰川轮廓的准确识别,最后基于SRTM DEM数据并利用山脊线自动提取方法^[35]获得各冰川区山脊线矢量数据,并以此对修订后的冰川边界进行分割,从而得到各单条冰川的矢量数据。

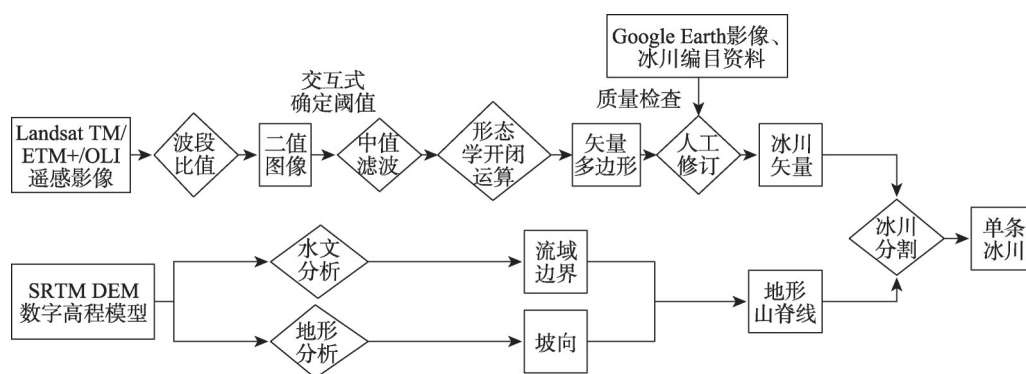


图2 基于Landsat影像的冰川边界提取过程

Fig. 2 The process of glacier boundary extraction based on Landsat imagery

冰川边界提取的精度主要受卫星传感器和图像配准误差的影响^[36,37],对于冰川边界遥感解译结果的检验可以通过地面调查或甚高空间分辨率的遥感数据分类结果作为参考数据。受限于研究区冰川多位于高海拔和自然条件恶劣的地区而难以实地考察,本文仅考虑遥感影像空间分辨率造成的误差,可由下式计算得出:

$$\varepsilon = N \times A \quad (1)$$

式中: ε 为影像空间分辨率造成的冰川面积误差(m^2); N 为冰川轮廓的周长(m); A 为半个像元的边长(m)。其中,由Landsat TM/ETM+/OLI遥感影像空间分辨率造成的冰川面积误差在2000年和2020年分别为 221.63 km^2 和 101.70 km^2 ,各占该期冰川面积的5.40%和2.79%。

1.3.2 湖泊信息提取及变化状态分析

本文采用水体指数和人工修订相结合的方式对湖泊边界进行提取。首先采用归一化差异水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)^[38]对2000年Landsat TM和2020年Sentinel 2A/2B MSI影像进行水体预提取,然后结合人工目视解译方法检查因NDWI阈值造成的湖泊水体漏判(水体边界不一致)或误判(将冰川识别为湖泊)。参考式(1),由Landsat TM和Sentinel 2A/2B MSI遥感影像空间分辨率造成的湖泊面积误差在2000年和2020年分别为 98.06 km^2 和 48.65 km^2 ,各占该期湖泊面积的0.81%和0.34%。

鉴于人工目视解译自身存在误差(受混合像元的影响),为更加科学地评判湖泊变化状况,本文采用下式计算各湖泊的面积变化状态^[39]:

$$C = \begin{cases} \text{Increase, if } \Delta S > 0 \text{ and } \Delta S > \Delta E \\ \text{Decrease, if } \Delta S < 0 \text{ and } \text{Abs}(\Delta S) > \Delta E \\ \text{Stable, if } \text{Abs}(\Delta S) \leq \Delta E \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta S = S_j - S_i \quad (3)$$

$$\Delta E = \frac{(P_i + P_j) \times H_c}{2} \quad (4)$$

式中： ΔS 为两期湖泊面积的差值 (m^2)， i 和 j 分别为年份； ΔE 为两期湖泊的面积误差 (m^2)； P_i 和 P_j 分别为 i 和 j 时刻的湖泊多边形周长 (m)； H_c 为 Landsat TM 和 Sentinel MSI 影像像元边长的一半，分别为 15 m 和 5 m。

2 结果分析

2.1 2000—2020年青海省冰川变化

表 1 列出了 2000 年和 2020 年青海省的冰川数量、面积、冰储量及其变化。显然，近 20 年间青海省冰川整体呈退缩态势，其中冰川数量减少 128 条 (-3.33%)，280 条冰川消失 (面积为 23.43 km^2)，131 条冰川分裂为 269 条 (面积从 445.31 km^2 减少为 280.42 km^2)；冰川面积和冰储量分别减少了 464.63 km^2 (-11.30%) 和 29.58 km^3 (-10.23%)，二者相对变化速率分别为 $-0.60\%/a$ 和 $-0.54\%/a$ 。从冰川规模来看 (图 3)，2000—2020 年除面积 $<0.1 \text{ km}^2$ 的冰川数量和面积增加、面积 $>50 \text{ km}^2$ 的冰川面积增加外，其余等级的冰川数量和面积均呈减少的趋势。其中，面积介于 $0.2\sim0.5 \text{ km}^2$ 的冰川数量减少最多 (-183 条)，面积介于 $2\sim5 \text{ km}^2$ 的冰川面积减少最多 (-108.97 km^2)；面积介于 $0.2\sim0.5 \text{ km}^2$ (-59.20 km^2)、 $0.5\sim1 \text{ km}^2$ (-52.41 km^2)、 $1\sim2 \text{ km}^2$ (-85.17 km^2) 和 $5\sim10 \text{ km}^2$ (-83.65 km^2) 的冰川面积减少均大于 50 km^2 。从各规模等级的冰川面积相对变化速率来看，冰川规模越小其退缩率越快。面积介于 $0.2\sim0.5 \text{ km}^2$ 的小冰川退缩最快 ($-1.00\%/a$)，面积介于 $10\sim20 \text{ km}^2$ ($-0.34\%/a$) 和 $20\sim50 \text{ km}^2$ ($-0.43\%/a$) 的冰川退缩速率最小。

山脉或山峰的绝对海拔高度及平衡线以上的相对高差，是决定山地冰川数量及规模的主要地形要素^[40]。冰川物质平衡是指单位面积冰川上分别以固态降水和冰川消融为主的物质收入和支出的代数和，冰川物质平衡线综合反映了区域气候和地形等多种因素对冰

表 1 2000—2020 年青海省冰川数量、面积及冰储量变化

Table 1 The change of number, area and volume of glacier in Qinghai province from 2000 to 2020

年份及变化	数量/条	面积/ km^2	冰储量/ km^3
2000 年	3841	4108.03	289.21
2020 年	3713	3643.40	259.63
绝对变化	-128	-464.63	-29.58
相对变化/ $(\%/a)$	-0.17	-0.60	-0.54

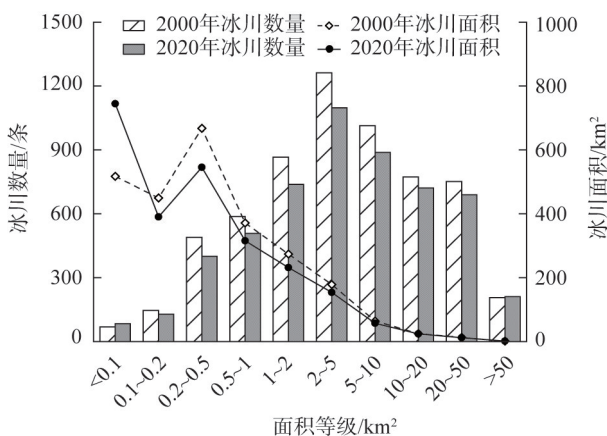


图 3 2000—2020 年青海省不同规模的冰川数量与面积变化

Fig. 3 The change of the number and area of glaciers in different sizes in Qinghai province from 2000 to 2020

川发育的影响，是冰川的气候—地貌指标。以200 m高差为间隔对冰川覆盖区海拔进行统计，结果表明青海省冰川面积随海拔呈正态分布（图4a）。2000年和2020年青海省冰川均发育在海拔4000~7000 m之间，面积集中分布于4600~6200 m之间，所占比例分别为97.26%和97.68%；除海拔6200~6800 m的冰川面积增加外，其余各海拔区间的冰川面积均呈现减少趋势，其冰川中值海拔相应由5450 m上升到5472 m。对比各海拔区间的冰川面积相对变化速率可知，随海拔梯度上升，冰川面积相对变化速率基本呈现递减趋势（图4b）。青海省境内各山系冰川发育规模差异较大（表2），其中昆仑山的冰川数量和面积最多（大），祁连山的冰川数量虽多于唐古拉山，但其冰川面积小于唐古拉山，可可西里地区的冰川数量和面积最少（小）。近20年间各山系的冰川数量和面积均呈现减少趋势，其中昆仑山的冰川面积减少最多（-183.78 km²），其次是唐古拉山（-152.76 km²）和祁连山（-118.44 km²），可可西里地区最少（-9.65 km²）。从冰川面积变化速率来看，祁连山的冰川退缩最快（-0.71%/a），昆仑山和唐古拉山基本相当，分别为-0.58%/a和-0.56%/a；可可西里地区最慢（-0.41%/a）。

朝向是影响冰川热量收支的关键地形要素。受山脉走向影响，青海省境内北朝向的冰川数量和面积最多（大），其次是东北和西北朝向，其余各朝向的冰川数量和面积较小（图5）。2000—2020年间，除朝向为南（2条）、西南（3条）、西（4条）和东（7条）的冰川数量略有增加外，其余各朝向冰川数量均呈减少趋势；而各朝向冰川面积均呈减少趋势，其中北朝向冰川退缩面积最大（-184.13 km²），其次是东北朝向（-109.24 km²）和西南朝向（-50.17 km²），其余朝向的冰川退缩面积均小于30 km²。统计各朝向的冰川

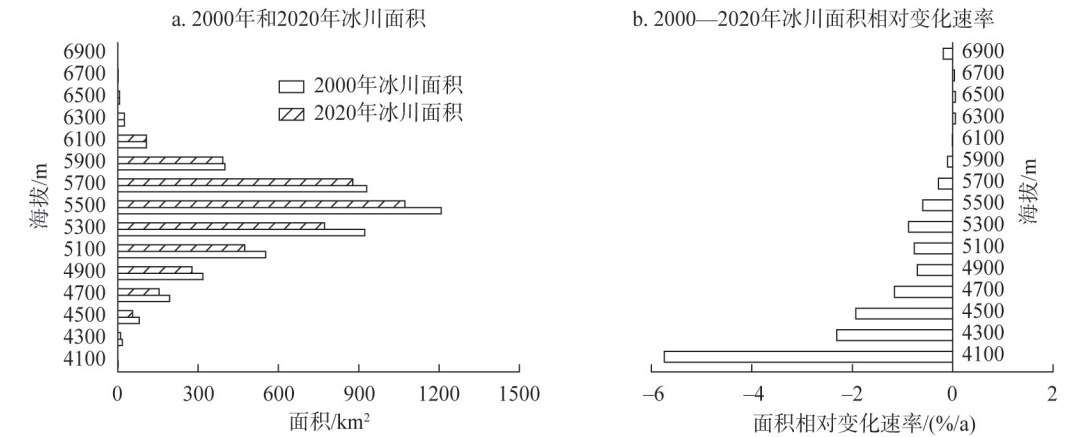


图4 2000—2020年青海省各海拔冰川面积变化

Fig. 4 The altitudinal characteristics of glacier area changes in Qinghai province from 2000 to 2020

表2 2000—2020年青海省各山系/地区冰川数量及面积变化

山系/地区	冰川数量/条			冰川面积/km ²			
	2000年	2020年	变化	2000年	2020年	绝对变化	相对变化/(%/a)
昆仑山	1803	1718	-85	1662.12	1478.34	-183.78	-0.58
祁连山	1189	1149	-40	887.24	768.80	-118.44	-0.71
唐古拉山	789	787	-2	1435.48	1282.72	-152.76	-0.56
可可西里	60	59	-1	123.19	113.54	-9.65	-0.41

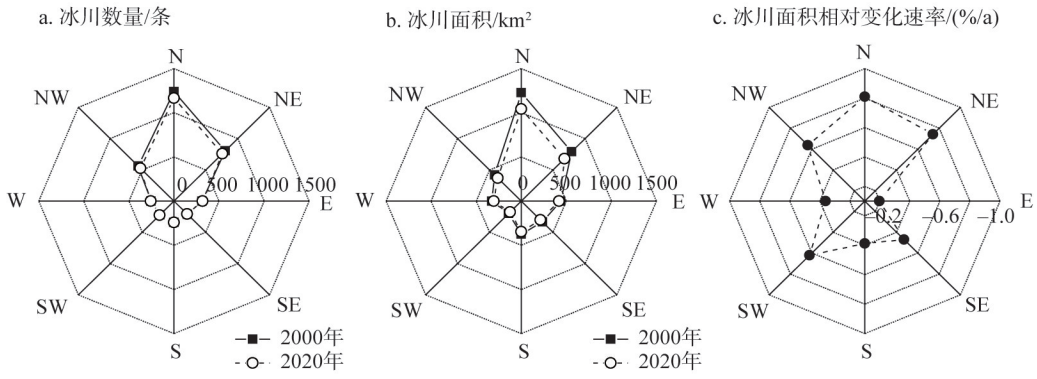


图5 2000—2020年青海省各朝向冰川数量和面积变化

Fig. 5 The orientational characteristics of glacier number and area changes in Qinghai province from 2000 to 2020

面积相对变化速率发现,朝向为北($-0.81\%/a$)、东北($-0.74\%/a$)、西北($-0.64\%/a$)和西南($-0.62\%/a$)的冰川退缩最快,朝向为东($-0.20\%/a$)的冰川退缩最慢。

为明确青海省冰川变化的区域分异规律,以经度 1° 为间隔统计青海省2000—2020年的冰川面积,并计算各区域冰川的面积变化及相对变化速率(图6a),结果显示各区域的冰川面积均呈现减少趋势。其中, $91^\circ\sim 92^\circ E$ 之间冰川面积退缩最多(-87.67 km^2),其次是 $94^\circ\sim 95^\circ E$ 之间(-68.23 km^2), $102^\circ\sim 103^\circ E$ 之间最少(-0.46 km^2)。从不同经度带的冰川面积变化相对速率对比分析,青海省冰川自西向东基本呈现加快退缩趋势,其中 $95^\circ\sim 96^\circ E$ 之间退缩最快($-1.60\%/a$), $90^\circ\sim 91^\circ E$ 之间退缩最慢($-0.28\%/a$)。青海省冰川中值面积海拔呈现自西向东逐渐降低趋势(图6b),冰川面积相对变化速率基本与中值面积海拔呈负相关关系,即中值面积海拔越高,冰川面积相对变化速率越小,这主要是因为高海拔地区冰川依靠低温条件存在,退缩较慢;海拔较低区域冰川面积较小且退缩主要发生在消融区。

2.2 2000—2020年青海省湖泊变化

2000—2020年,青海省面积 $\geq 1\text{ km}^2$ 的湖泊数量从204个增加为231个,湖泊面积从

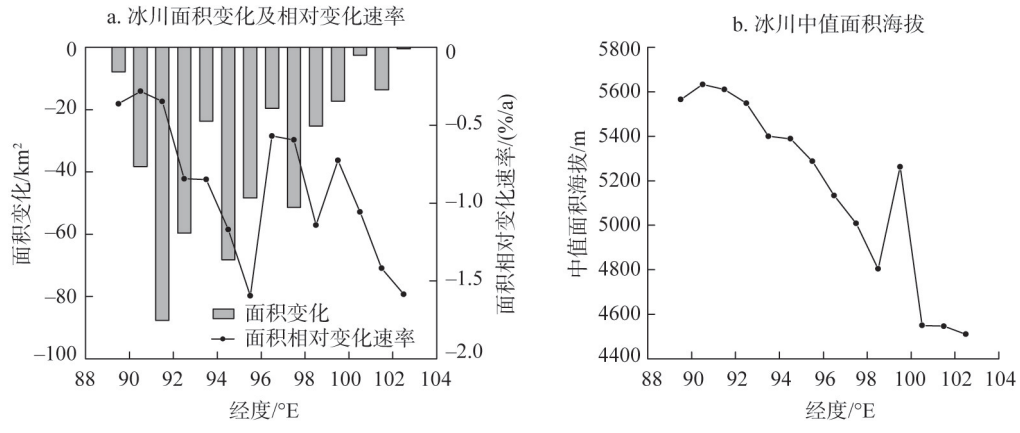


图6 2000—2020年青海省不同经度带的冰川面积变化

Fig. 6 Area changes of glaciers in different longitude zones in Qinghai province from 2000 to 2020

12153.57 km² 增长至 14374.56 km²，湖泊面积绝对变化和相对变化分别为 2220.99 km² 和 0.84%/a，青海省湖泊整体呈扩张趋势。根据 2000—2020 年青海省不同规模湖泊的数量与面积变化（图 7）可知，近 20 年青海省除面积介于 1~2 km² 的湖泊数量有所减少、面积介于 10~20 km² 的湖泊数量和面积有所减少、面积介于 20~50 km² 的湖泊面积有所减少外，其余面积等级的湖泊数量和面积均呈现不变或增加趋势；面积介于 2~5 km² 的湖泊数量增加最多（22 个），面积介于 500~1000 km² 的湖泊面积增加最大（928.56 km²），且面积≥50 km² 的各等级湖泊面积增加均大于 100 km²。

按照中国冰川编目，青海省可划分黄河（5J）、长江（5K）、澜沧江（5L）、东亚内流区（5Y）和青藏高原内流区（5Z）5 个一级流域。由表 3 可知，2020 年长江流域的湖泊数量最多（89 个），澜沧江流域最少（1 个）；东亚内流区的湖泊面积最大（7779.01 km²），其次为青藏高原内流区（3966.55 km²），澜沧江流域湖泊面积最小（20.70 km²）。在二级流域中，金沙江（5K4，青海省境内为通天河）流域湖泊数量最多（87 个），大通河（5J4）、雅砻江（5K5，青海省境内为清水河）、岷江（5K6，青海省境内为马可河）、扎

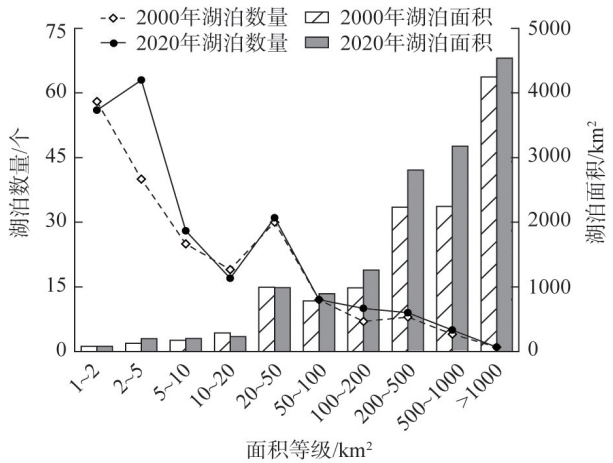


图7 2000—2020年青海省不同规模的湖泊数量与面积变化

Fig. 7 The change of the number and area of lakes in different sizes in Qinghai province from 2000 to 2020

表3 2000—2020年青海省各流域的湖泊数量与面积变化

Table 3 The characteristics of lake number and area changes in different river basins of Qinghai province from 2000 to 2020

一级流域 (编码)	二级流域 (编码)	湖泊数量/个			湖泊面积/km ²			
		2000年	2020年	变化	2000年	2020年	绝对变化	相对变化/(%/a)
黄河(5J)	黄河上游段(5J3)	34	38	4	1425.36	1518.56	93.20	0.32
	大通河(5J4)	1	1	0	2.82	3.19	0.37	0.62
	合计	35	39	4	1428.18	1521.76	93.58	0.32
长江(5K)	通天河(5K4)	77	87	10	875.19	1083.32	208.13	1.07
	清水河(5K5)	1	1	0	1.09	1.72	0.63	2.30
	马可河(5K6)	1	1	0	1.52	1.50	-0.02	-0.07
	合计	79	89	10	877.80	1086.54	208.74	1.07
澜沧江(5L)	扎曲(5L4)	1	1	0	20.30	20.70	0.40	0.10
东亚内流区 (5Y)	河西内流区(5Y4)	3	4	1	31.62	41.23	9.61	1.34
	柴达木内流区(5Y5)	51	53	2	6812.36	7737.78	925.42	0.64
	合计	54	57	3	6843.98	7779.01	935.03	0.64
青藏高原内 流区(5Z)	楚玛尔河(5Z1)	11	12	1	1337.50	1752.85	415.35	1.36
	沱沱河(5Z2)	24	32	8	1638.46	2192.50	554.04	1.47
	多格错仁湖(5Z5)	1	1	0	7.36	21.20	13.84	5.43
	合计	36	45	9	2983.31	3966.55	983.24	1.43

曲(5L4)和多格错仁湖(5Z5)流域的湖泊数量均为1个;柴达木内流区(5Y5)湖泊面积最大(7737.78 km²),马可河流域湖泊面积最小(1.50 km²)。2000—2020年间,除马可河流域湖泊面积有所减少外,其余各流域均呈现增加趋势,其中多格错仁湖流域的湖泊面积增加最快(5.43%/a),扎曲流域的湖泊面积增长最慢(0.10%/a)。从湖泊面积变化空间分布(图8)来看,2000—2020年青海省大部分地区的湖泊(71.36%)面积呈现增加态势,面积减少的湖泊(24.12%)主要分布在柴达木盆地中部和北部、唐古拉山北侧及青海省东南部年保玉则峰东侧,面积变化较小的湖泊(4.52%)分布则较为零散。其中,青海湖和东台吉乃尔湖的面积变化最大,分别为289.54 km²和-130.15 km²;盐湖扩张速率和北霍布逊湖萎缩速率最快,分别为9.15%/a和-8.94%/a。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 2020年青海省冰川数量、面积和冰储量分别为3713条、3643.40 km²和259.63 km³,冰川数量以<0.1 km²的冰川为主,面积则以介于2~5 km²的冰川为主,其中北朝向的冰川数量(1167条)和面积(1042.27 km²)最多(大);面积≥1 km²的湖泊数量和面积分别为231个和14374.56 km²,湖泊数量以介于2~5 km²的湖泊为主,面积则以>1000 km²的湖泊为主,其中长江流域的湖泊数量最多(89个),东亚内流区的湖泊面积

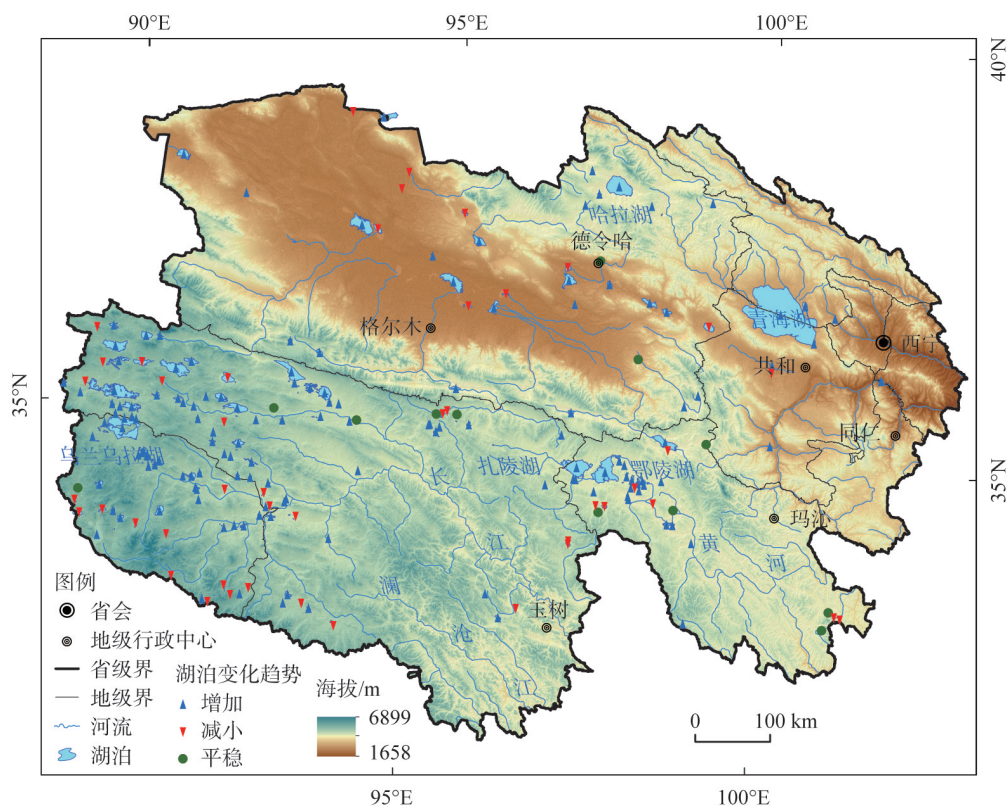


图8 2000—2020年青海省湖泊面积变化空间分异

Fig. 8 Spatial variation in area changes of lakes in Qinghai province from 2000 to 2020

最大 (7779.01 km²)。

(2) 2000—2020年青海省冰川呈萎缩态势。受西北地区气候暖湿化影响,近20年青海省冰川数量、面积和冰储量分别减少128条(-3.33%)、464.63 km²(-11.31%)和29.58 km³(-10.23%)。青海省冰川变化呈现一定的空间异质性,中东部地区冰川退缩速率快于西部地区,其中祁连山冰川面积退缩最快(-0.71%/a),昆仑山和唐古拉山基本相当(分别为-0.58%/a和-0.56%/a),可可西里地区最慢(-0.41%/a)。由于冰川末端退缩,其中值海拔从5450 m上升到5472 m。

(3) 2000—2020年青海省湖泊呈快速扩张趋势,面积≥1 km²的湖泊数量和面积分别增加27个和2220.09 km²,近20年湖泊面积增加比例高达18.27%。除柴达木盆地中部和北部、唐古拉山北侧及年保玉则峰东侧等区域外,青海省大部分区域的湖泊水域面积都呈增加趋势。青海省境内湖泊变化主要受降水和冰川融水变化等自然因素影响,但个别湖泊变化与人类活动增强密切相关。湖泊扩张已经或即将对湖周草场和道路、居民点等基础设施构成直接威胁,未来应加强对潜在危险性湖泊的监测,并及时制订相应的防灾减灾措施。

3.2 讨论

3.2.1 青海省冰川和湖泊对气候变化的响应

冰川和湖泊演变与气候变化存在密切联系,在较长的时间尺度和较大的空间范围上,影响冰川和湖泊变化的主要气象因子分别是气温和降水。基于中国地面气温与降水月值0.5°×0.5°格点数据集,2000—2020年青海省大部分区域的夏季气温变化率大于0.15 °C/10 a,且由西北向东南呈递增趋势(图9a);年降水量变化率空间差异极大,降水增多主要出现在青海省东部和昆仑山等地区,而唐古拉山降水则呈减少趋势(图9b)。已有研究表明,夏季平均气温升高1 °C会导致冰川平衡线升高100~160 m,造成的物质损失需要降水增加40%~50%的补给才能保持物质平衡^[41,42],显然气温上升给冰川物质平衡带来的影响仅靠年降水量的增加远不能弥补,从而导致青海省境内冰川整体呈现退缩趋势,且中东部的退缩较西部更为明显。冰川融化使得冰川融水增加,结合大气降水增加,直

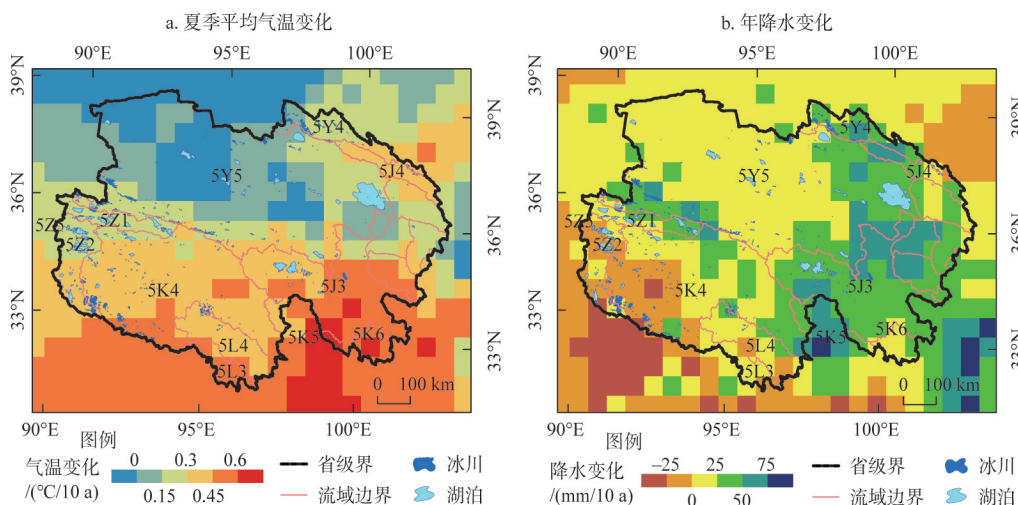


图9 2000—2020年青海省夏季平均气温和年降水变化

Fig. 9 The change of average temperature in summer and annual precipitation in Qinghai province from 2000 to 2020

接导致湖泊补给水源增加,这与本文中青海省大部分地区湖泊呈现面积增加态势的结论基本一致。湖泊面积减少区域的年降水量增加趋势不明显,气温升高造成蒸发量增加,导致柴达木盆地中部和北部、唐古拉山北侧及青海省东南部年保玉则峰东侧的湖泊逐渐萎缩。

从流域尺度来看(图10),2000—2020年青海省各一级流域的冰川均呈现退缩趋势,湖泊均呈现扩张趋势,但其变化趋势存在空间异质性。其中,澜沧江流域冰川退缩最快($-1.79\%/a$),青藏高原内流区湖泊扩张最快($1.43\%/a$)。从二级流域来看,分布在青海省南部地区的各流域冰川退缩率普遍大于北部,与各流域夏季平均气温变化趋势基本一致;而湖泊面积变化速率与流域的性质有关,内流区的湖泊面积变化速率明显大于外流区。此外,湖泊自身特征差异对湖泊面积的变化影响较大。以哈拉湖和太阳湖为例(图11),二者均为冰川融水补给湖,但哈拉湖属于典型的封闭式咸水湖,水系呈向心状,入湖河流多为季节性河流,在冰川退缩、融水增多背景下,湖泊面积呈现较为显著的增加趋势;而太阳湖地处布喀达坂峰和马兰山的山间盆地,属硫酸钠亚型淡水湖,南部的冰川融水汇入太阳湖后,出流从东部注入布南湖并经洪水河汇入那棱格勒河,此类“吞吐型”冰川湖泊可以保证增加的冰川融水通过出水口及时排除,使其处于相对稳定的水量平衡状态,面积变化不显著。因此,辨析冰川融水径流和大气降水对湖泊水量的补给差异及贡献大小不仅依赖于长期气象水文观测资料,而且取决于湖泊自身特征(如有无出水口、是否与冰川末端相连等)及入湖径流构成等诸多要素。

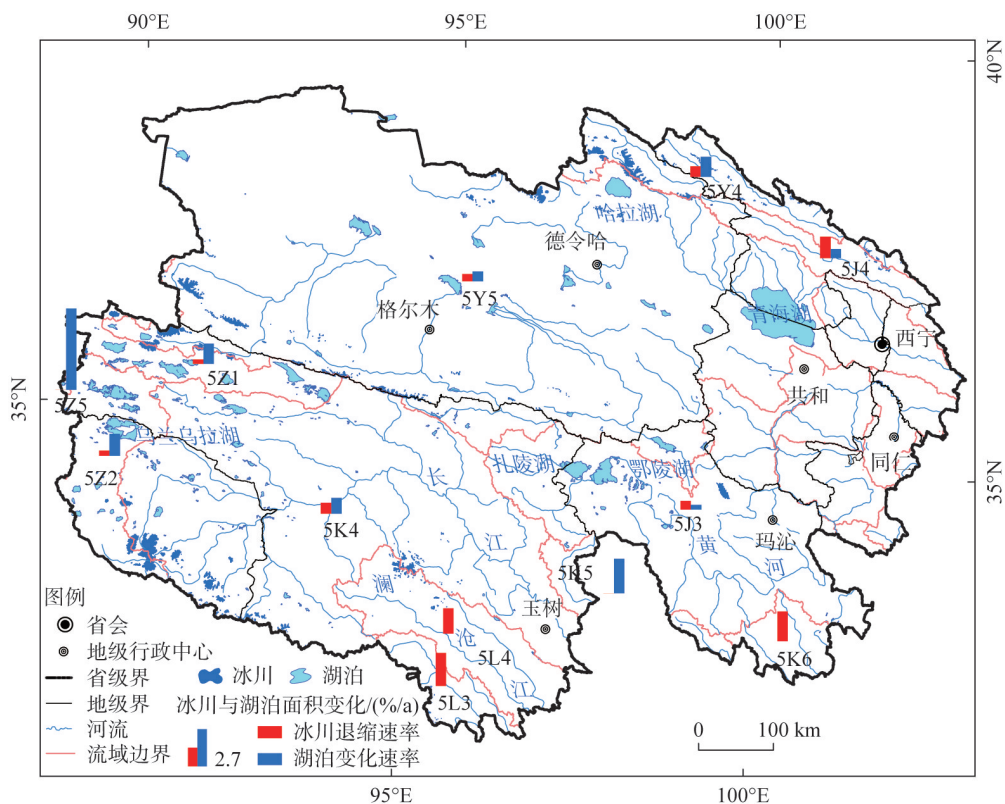


图10 2000—2020年青海省各流域冰川与湖泊面积变化对比

Fig. 10 The characteristics of glacier and lake area changes in different basins of Qinghai province from 2000 to 2020

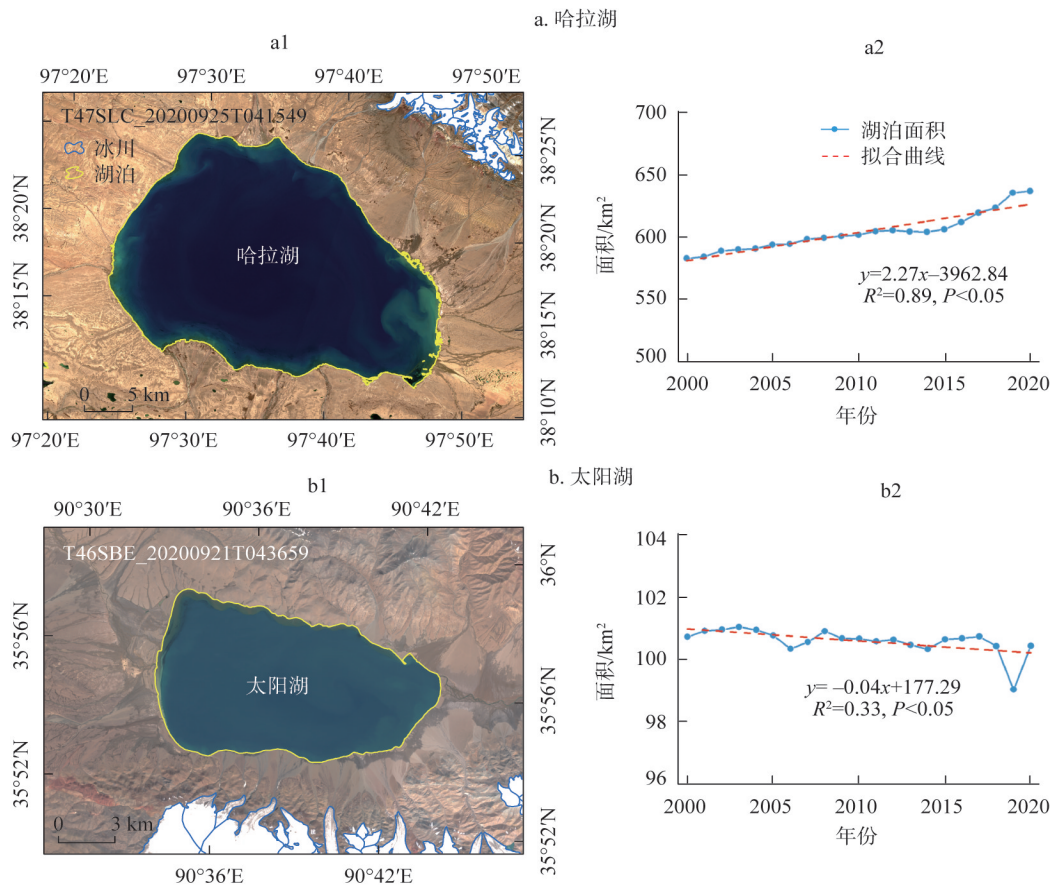


图 11 2000—2020 年哈拉湖和太阳湖的面积变化对比

Fig. 11 The comparison of the area changes of Hala Lake and Taiyang Lake from 2000 to 2020

3.2.2 人类活动对湖泊的影响

青海省境内的湖泊大多受人类活动直接影响较小^[43], 且以咸水湖和盐湖为主要类型, 如柴达木盆地湖泊以盐湖为主, 湖盆大多地势平坦, 主要以大气降水和冰川融水作为补给源^[44]。为有效开发利用盐湖资源, 人类在湖区建坝阻隔河湖连通, 直接导致盆地内盐湖的空间格局、面积和功能发生变化。以东台吉乃尔湖为例, 2009年湖泊西北面的人工修筑堤坝和对其源头台吉乃尔河的改道截流, 致使东台吉乃尔湖渐趋干盐化, 遥感影像解译结果显示 2020 年湖泊面积仅为 2000 年的 31.29%。位于可可西里地区的盐湖因 2011 年上游卓乃湖溃决导致其面积快速扩张^[45], 并对青藏铁路和青藏公路的安全运行构成直接威胁^[46]。为此, 2019 年青海省水利厅建成可可西里盐湖引流疏导应急工程, 在湖区东南侧开挖一条宽约 50 m 的排水通道, 经清水河注入楚玛尔河, 从根本上消除了盐湖自然漫溢的风险, 这也使盐湖由内流湖转为外流湖。

青海省南部分布着一些淡水湖, 如位于黄河源头的扎陵湖和鄂陵湖。鄂陵湖是青藏高原第一大淡水湖, 湖水补给主要依靠大气降水和地表径流, 属重碳酸盐类、镁 I 型淡水湖^[47]。为解决玛多县的用电问题, 1998 年修建黄河源水电站, 2005 年上游来水猛增造成水库回水直达鄂陵湖, 直接导致 2006—2008 年鄂陵湖面积的快速扩张, 2012 年达峰

值。水电站的修建抬高了湖区水位,提升了湖区的调节能力,降低了黄河冬季断流的可能性;而为了消除黄河下游的防洪安全隐患,2017年对水电站进行拆除,2018—2020年鄂陵湖扩张速率变缓,湖泊面积趋于稳定化。

3.2.3 冰川湖泊变化造成的影响

全球气候变暖使得青藏高原大部分地区冰川呈现加速消融状态,冰川融水补给的增加导致该地区大部分湖泊呈现扩张趋势^[48-52]。冰川和湖泊变化及不稳定性增加等一系列变化导致的次生灾害频发,如冰崩^[53]、雪崩^[54,55]、冰川跃动^[56,57]、冰湖溃决洪水^[58-60]和冰川泥石流^[61,62],以及冰川融水径流的变化对河流补给的影响^[63,64],直接对当地居民的生命财产安全和基础设施等构成威胁。

湖泊面积增加和水位上升使其周围房屋和公路等基础设施被淹没,严重时会发生湖泊溃决并引发溃决洪水和泥石流等一系列次生灾害^[20]。以青海湖为例,1973—2004年湖区面积和水位均呈现下降趋势,使得湖岸线发生变迁,沙岛湖渐趋萎缩,沙质荒漠化程度加剧,加上人类的不合理开发利用活动,青海湖周围的草地出现较为严重的退化现象^[19]。青海湖的萎缩和生态环境的恶化引起了人们的高度关注,通过转变发展模式进行生态管理。2004—2020年青海湖面积呈现波动增加趋势(15.37 km²/a),2020年青海湖面积达近20年来最大值(4439.65 km²),湖泊扩张导致铁布卡湾、泉湾和鸟岛等地区的道路、码头、草场和居民点被淹没^[19],对当地牧民的生存造成一定程度的威胁,并导致刚毛藻水华范围有所扩大^[65]。未来为了能够及时应对因冰川退缩和湖泊扩张引发的次生灾害,应加强对山区、地势低洼地段和湖水可能溢出危险区的监测,结合地形、水文和植被等诸多自然环境因素,从流域层面加快完善防灾减灾体系建设。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.
- [2] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书2021. 北京: 科学出版社, 2021: 12-17. [China Meteorological Administration Climate Change Centre. Blue Book on Climate Change in China 2021. Beijing: Science Press, 2021: 12-17.]
- [3] 鲁安新, 姚檀栋, 刘时银, 等. 青藏高原各拉丹东地区冰川变化的遥感监测. 冰川冻土, 2002, 24(5): 559-562. [LU A X, YAO T D, LIU S Y, et al. Glacier change in the Geladandong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 559-562.]
- [4] 郭妮, 张杰, 梁芸. 西北地区近年来内陆湖泊变化反映的气候问题. 冰川冻土, 2003, 25(2): 211-214. [GUO N, ZHANG J, LIANG Y. Climate change indicated by the recent change of inland lakes in Northwest China. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 211-214.]
- [5] 柯长青. 湖泊遥感研究进展. 海洋湖沼通报, 2004, 23(4): 81-86. [KE C Q. A review of monitoring lake environment change by means of remote sensing. Transactions of Oceanology and Limnology, 2004, 23(4): 81-86.]
- [6] 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. 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. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 459-464.]
- [7] 姚檀栋, 姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响. 自然杂志, 2010, 32(1): 4-8. [YAO T D, YAO Z J. Impacts of glacial retreat on runoff on Tibetan Plateau. Chinese Journal of Nature, 2010, 32(1): 4-8.]
- [8] 姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1377-1390. [YAO X J, LIU S Y, SUN M P, et al. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century. Journal of Natural Resources, 2014, 29(8): 1377-1390.]
- [9] 叶庆华, 程维明, 赵永利, 等. 青藏高原冰川变化遥感监测研究综述. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 920-930. [YE Q H, CHENG W M, ZHAO Y L, et al. A review on the research of glacier changes on the Tibetan Plateau by remote

- sensing technologies. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(7): 920-930.]
- [10] 张懿铨, 李炳元, 刘林山, 等. 再论青藏高原范围. *地理研究*, 2021, 40(6): 1543-1553. [ZHANG Y L, LI B Y, LIU L S, et al. Redetermine the region and boundaries of Tibetan Plateau. *Geographical Research*, 2021, 40(6): 1543-1553.]
- [11] 张懿铨, 刘林山, 李炳元, 等. 青藏高原界线 2021 年版数据集. *全球变化数据仓储电子杂志(中英文)*, 2021: 7. [ZHANG Y L, LIU L S, LI B Y, et al. Boundary data of the Tibetan Plateau (2021 Version). *Digital Journal of Global Change Data Repository*, 2021: 7.]
- [12] YAO T, PU J, LU A, et al. Recent glacial retreat and its impact on hydrological processes on the Tibetan Plateau, China, and surrounding regions. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2007, 39(4): 642-650.
- [13] 马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(3): 394-401. [MA R H, YANG G S, DUAN H T, et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 41(3): 394-401.]
- [14] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告. 北京: 科学出版社, 2002: 3-8. [QIN D H. *Synthesis Report on Environmental Evolution Assessment in Western China*. Beijing: Science Press, 2002: 3-8.]
- [15] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [16] YAO T. Glacial fluctuations and its impacts on lakes in the Southern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(20): 2071.
- [17] SONG C, SHENG Y. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis. *Climatic Change*, 2016, 135: 493-507.
- [18] DONG H, SONG Y, ZHANG M. Hydrological trend of Qinghai Lake over the last 60 years: Driven by climate variations or human activities?. *Journal of Water and Climate Change*, 2019, 10(3): 524-534.
- [19] 祁苗苗, 姚晓军, 刘时银, 等. 1973—2018年青海湖岸线动态变化. *湖泊科学*, 2020, 32(2): 573-586. [QI M M, YAO X J, LIU S Y, et al. Dynamic change of Lake Qinghai shoreline from 1973 to 2018. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(2): 573-586.]
- [20] 程俭, 刘昌华, 刘凯, 等. 2004年以来青海湖快速扩张对人居设施与草地的潜在影响. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 922-934. [CHENG J, LIU C H, LIU K, et al. Potential impact of the dramatical expansion of Lake Qinghai on the habitat facilities and grassland since 2004. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 922-934.]
- [21] SUN M, LIU S, YAO X, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half-century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(2): 206-220.
- [22] 蒋宗立, 刘时银, 郭万钦, 等. 黄河源区阿尼玛卿山典型冰川表面高程近期变化. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 231-237. [JIANG Z L, LIU S Y, GUO W Q, et al. Recent surface elevation changes of three representative glaciers in Anyemaqên Mountains, source region of Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 231-237.]
- [23] 高永鹏, 姚晓军, 安丽娜, 等. 2000—2010年祁连山冰川冰储量变化. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 325-333. [GAO Y P, YAO X J, AN L N, et al. Change of ice volume in the Qilian Mountains during the period from 2000 to 2010. *Arid Zone Research*, 2018, 35(2): 325-333.]
- [24] 汪赢政, 李佳, 吴立新, 等. 1987—2018年祁连山冰川变化遥感监测及影响因子分析. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 344-356. [WANG Y Z, LI J, WU L X, et al. Using remote sensing images to monitor the glacier changes in Qilian Mountains during 1987-2018 and analysing the impact factors. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2): 344-356.]
- [25] 王盛, 姚檀栋, 蒲健辰. 祁连山七一冰川物质平衡的时空变化特征. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 399-412. [WANG S, YAO T D, PU J C. Spatial and temporal variations in mass balance of Qiyi Glacier in Qilian Mountains. *Journal of Natural Resource*, 2020, 35(2): 399-412.]
- [26] 高永鹏, 姚晓军, 刘时银, 等. 1956—2017年河西内流区冰川资源时空变化特征. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1313-1325. [GAO Y P, YAO X J, LIU S Y, et al. Spatial-temporal variation of glacier resources in the Hexi interior from 1956 to 2017. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1313-1325.]
- [27] 闫利, 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. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 573-589. [LYU 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. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 573-589.]
- [28] 汤秋鸿, 兰措, 苏凤阁, 等. 青藏高原河川径流变化及其影响研究进展. *科学通报*, 2019, 64(27): 2807-2821. [TANG

- Q H, LAN C, SU F G, et al. Streamflow change on the Qinghai-Tibet Plateau and its impacts. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2807-2821.]
- [29] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变化背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1220-1232. [WANG N L, YAO T D, XU B Q, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1220-1232.]
- [30] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次编目的中国冰川现状. *地理学报*, 2015, 70(1): 3-16. [LIU S Y, YAO X J, GUO W Q, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16.]
- [31] VAN Z J J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): A breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 2001, 48: 559-565.
- [32] PAUL F, BARRY R G, COGLEY J G, et al. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*, 2010, 50(53): 119-126.
- [33] 王媛, 吴立宗, 许君利, 等. 1964—2010年青藏高原长江源各拉丹冬地区冰川变化及不确定性分析. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 255-262. [WANG Y, WU L Z, XU J L, et al. Variation and uncertainty analysis of the glaciers in the past 50 years in Geladandong of Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 255-262.]
- [34] GUO W, LIU S, XU J, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 2015, 61: 357-372.
- [35] 郭万钦, 刘时银, 余蓬春, 等. 利用流域边界和坡向差自动提取山脊线. *测绘科学*, 2011, 36(6): 210-212, 191. [GUO W Q, LIU S Y, YU P C, et al. Automatic extraction of ridgelines using on drainage boundaries and aspect difference. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(6): 210-212, 191.]
- [36] WILLIAMS R S, HALL D K, SIGUROSSON O. Comparison of satellite- derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973-1992. *Annals of Glaciology*, 1997, 24(3): 72-80.
- [37] HALL D K, BAYR K J, SCHNÖER W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893-2001). *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 566-577.
- [38] 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.
- [39] 李晓锋, 姚晓军, 孙美平, 等. 2000—2014年中国西北地区湖泊面积的时空变化. *生态学报*, 2018, 38(1): 96-104. [LI X F, YAO X J, SUN M P, et al. Spatial-temporal variations in lakes in Northwest China from 2000 to 2014. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 96-104.]
- [40] GÄRTNER-ROER I, NAEGELI K, HUSS M, et al. A database of worldwide glacier thickness observations. *Global and Planetary Change*, 2014, 122: 330-344.
- [41] RAPER S C B, BROWN O, BRAITHWAITE R J. A geometric glacier model for sea level change calculations. *Journal of Glaciology*, 2000, 46(154): 357-368.
- [42] OERLEMANS J. Linear modelling of glacier length fluctuations. *Geografiska Annale: Series A Physical Geography*, 2012, 94(2): 183-194.
- [43] 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. *湖泊科学*, 2011, 23(3): 311-320. [LI J L, SHENG Y W, LUO J C, et al. Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(3): 311-320.]
- [44] 王苏民, 窦鸿身. *中国湖泊志*. 北京: 科学出版社, 1998: 483-484. [WANG S M, DOU H S. *Records of Chinese Lakes*. Beijing: Science Press, 1998: 483-484.]
- [45] 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. [YAO X J, LIU S Y, SUN M P, et al. Changes of Kusai Lake in Hoh Xil region and causes of its water overflowing. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 689-698.]
- [46] YAO X, SUN M, GONG P, et al. Overflow probability of the Salt Lake in Hoh Xil Region. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(5): 647-655.
- [47] 苟照君, 刘峰贵. 鄂陵湖. *全球变化数据学报*, 2019, 3(1): 91-92. [GOU Z J, LIU F G. Ngoring Lake, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2019, 3(1): 91-92.]

- [48] 姚檀栋, 余武生, 郭光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险. 科学通报, 2019, 64(27): 2770-2782. [YAO T D, YU W S, WU G J, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2770-2782.]
- [49] 朱立平, 张国庆, 杨瑞敏, 等. 青藏高原最近40年湖泊变化的主要表现与发展趋势. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1254-1263. [ZHU L P, ZHANG G Q, YANG R M, et al. Lake variations on Tibetan Plateau of recent 40 years and future changing tendency. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1254-1263.]
- [50] 郭光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1285-1292. [WU G J, YAO T D, WANG W C, et al. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpine. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1285-1292.]
- [51] 赵华秋, 王欣, 赵轩茹, 等. 2008—2018年中国冰川变化分析. 冰川冻土, 2021, 43(4): 976-986. [ZHAO H Q, WANG X, ZHAO X R, et al. Analysis of glacier changes in China from 2008 to 2018. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 976-986.]
- [52] 李东昇, 张仁勇, 崔步礼, 等. 1986—2015年青藏高原哈拉湖湖泊动态对气候变化的响应. 自然资源学报, 2021, 36(2): 501-512. [LI D S, ZHANG R Y, CUI B L, et al. Response of lake dynamics to climate change in the Hala Lake basin of Tibetan Plateau from 1986 to 2015. Journal of Natural Resource, 2021, 36(2): 501-512.]
- [53] 胡文涛, 姚檀栋, 余武生, 等. 高亚洲地区冰崩灾害的研究进展. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1141-1152. [HU W T, YAO T D, YU W S, et al. Advances in the study of glacier avalanches in High Asia. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1141-1152.]
- [54] 魏玉光, 杨浩, 韩学雷. 青藏高原铁路沿线雪崩危险度评价方法. 中国安全科学学报, 2004, 14(4): 40-42. [WEI Y G, YANG H, HAN X L. Method for avalanche risk evaluation along Qinghai-Tibet Plateau railway. China Safety Science Journal, 2004, 14(4): 40-42.]
- [55] 文洪, 王栋, 王生仁, 等. 藏东南帕隆藏布流域雪崩关键影响因素与易发性区划研究. 工程地质学报, 2021, 29(2): 404-415. [WEN H, WANG D, WANG S R, et al. Key predisposing factors and susceptibility mapping of snow avalanche in Parlun-Tsangpo catchment, Southeast Tibetan Plateau. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 404-415.]
- [56] 高永鹏, 姚晓军, 刘时银, 等. 1973—2018年布喀达坂峰地区前进冰川遥感监测. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1666-1681. [GAO Y P, YAO X J, LIU S Y, et al. Remote sensing monitoring of advancing glaciers in the Bukatage Mountains from 1973 to 2018. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1666-1681.]
- [57] LI Y, SU L, ZOU Q, et al. Risk assessment of glacial debris flow on alpine highway under climate change: A case study of Aierkuran Gully along Karakoram Highway. Journal of Mountain Science, 2021, 18(6): 1458-1475.
- [58] 康世昌, 郭万钦, 吴通华, 等. “一带一路”区域冰冻圈变化及其对水资源的影响. 地球科学进展, 2020, 35(1): 1-17. [KANG S C, GUO W Q, WU T H, et al. Cryospheric changes and their impacts on water resources in the Belt and Road regions. Advance in Earth Science, 2020, 35(1): 1-17.]
- [59] ZHENG G, MERGILI M, EMMER A, et al. The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwucuo, Tibet: Causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment. The Cryosphere, 2021, 15(7): 3159-3180.
- [60] NAZIR A B, PENG C, PAUL A C, et al. Increasing glacial lake outburst flood hazard in response to surge glaciers in the Karakoram. Earth-Science Reviews, 2021, 212: 103432, Doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103432.
- [61] 崔鹏, 郭晓军, 姜天海, 等. “亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1313-1321. [CUI P, GUO X J, JIANG T H, et al. Disaster effect induced by Asian water tower change and mitigation strategies. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1313-1321.]
- [62] BHAMBRI R, HEWITT K, KAWISHWAR P, et al. Ice-dams, outburst floods, and movements heterogeneity of glaciers, Karakoram. Global and Planetary Change, 2019, 180: 100-116.
- [63] 孙美平, 李忠勤, 姚晓军, 等. 1959—2008年乌鲁木齐河源1号冰川融水径流变化及其原因. 自然资源学报, 2017, 27(4): 650-660. [SUN M P, LI Z Q, YAO X J, et al. Analysis of runoff variation of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River from 1959 to 2008. Journal of Natural Resources, 2017, 27(4): 650-660.]
- [64] 冉思红, 王晓蕾, 罗毅. 多模式预测气候变化及其对雪冰流域径流的影响. 干旱区地理, 2021, 44(3): 807-818. [RAN S H, WANG X L, LUO Y. Predicting climate change and its impact on runoff in snow-ice basin with multi-climate models. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 807-818.]
- [65] DUAN H, YAO X, ZHANG D, et al. Long-term temporal and spatial monitoring of Cladophora blooms in Qinghai

Lake based on multi-source remote sensing images. Remote Sensing, 2022, 14: 853.

Characteristics of glacier and lake variations in Qinghai province from 2000 to 2020

ZHANG Cong¹, YAO Xiao-jun¹, XIAO Jian-she², ZHANG Hong-fang¹, WANG Yu¹, XUE Jiao¹

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

2. Qinghai Province Institute of Meteorological Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: As the sensitive indicator of climate change, the dynamic change of glaciers and lakes is of great significance to reveal global climate change. Based on Landsat TM/ETM+/OLI and Sentinel 2A/2B MSI remote sensing images, this study obtained information on glaciers and lakes in Qinghai province to explore their dynamic changes and response to climate change over the past two decades. Qinghai possessed glaciers with a number of 3713, an area of 3643.40 km² and ice volume of 259.63 km³, and lakes with a number of 231 and an area of 14374.56 km² in 2020. Due to the warming and humidification of climate in 2000-2020, the number, area and ice volume of glaciers decreased by 128, 464.63 km² (-0.60%/a) and 29.58 km³ (-0.54%/a), while the number and area of lakes increased by 27 and 2220.09 km² (0.84%/a) in the province. The trend of glacier change was accelerated, decreasing from west to east in the study area, and the temperature rise was the main factor. Except for the Central and Northern Qaidam Basin and the Northern Tanggula Mountains, the lake area in most parts of Qinghai presented an increasing trend. Both the regional difference of precipitation and runoff from glacier meltwater led to the expansion of most lakes. Meanwhile, the evolution of individual lakes was significantly affected by the enhancement of human activities. The expansion of some lakes has posed a direct threat to the settlements, roads and grassland around the lakes, especially triggers ecological problems such as Cladophora blooms. Therefore, the monitoring and mitigation measures of potentially dangerous lakes should be strengthened in the future.

Keywords: glacier; lake; climate change; Qinghai province