

青藏高原湖泊面积、水位与水量变化 遥感监测研究进展

张国庆¹, 王蒙蒙^{1,2}, 周陶^{1,2}, 陈文锋^{1,2}

1. 中国科学院青藏高原研究所 青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 青藏高原湖泊数量多、分布广、所占面积大, 是亚洲水塔的重要组成部分, 其受到人类活动的干扰较少, 是理解高原生态环境变化机理的钥匙。青藏高原湖泊是气候变化敏感的指示器, 在全球快速变暖背景下其对气候变化的响应如何? 本研究基于多源遥感数据监测结果, 系统地总结了青藏高原湖泊(大于1 km²)在过去近50 a(1976年—2018年)的面积、水位与水量变化等方面的研究进展。主要结论如下: (1) 青藏高原湖泊总数量从1970s的1080个增加到2018年的1424个(+32%), 湖泊总面积从4万km²扩张到5万km²(+25%), 湖泊平均水位上升了约4 m, 湖泊水储量增加了近1700亿吨; (2) 时间上, 湖泊面积、水位和水量变化在1970s—1995年略有下降, 随后呈快速但非线性增加的态势; 空间上, 中—北部湖泊面积、水位与水量增长, 南部减少; (3) 基于多源遥感数据的湖泊水量平衡定量研究揭示了降水增加是湖泊扩张的主要驱动因素, 冰川消融贡献次之。气候与冰冻圈控制的湖泊水量平衡的定量评估及湖泊变化驱动机制研究等是目前面临挑战的前沿科学问题。

关键词: 湖泊, 遥感, 面积, 水位, 水量, 青藏高原

引用格式: 张国庆, 王蒙蒙, 周陶, 陈文锋. 2022. 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化遥感监测研究进展. 遥感学报, 26(1): 115–125

Zhang G Q, Wang M M, Zhou T and Chen W F. 2022. Progress in remote sensing monitoring of lake area, water level, and volume changes on the Tibetan Plateau. National Remote Sensing Bulletin, 26(1): 115–125 [DOI: 10.11834/jrs.20221171]

1 引言

湖泊不仅是重要的水资源, 也是水循环的重要组成部分, 对气候变化与人类活动影响非常敏感(王苏民和窦鸿身, 1998)。青藏高原平均海拔约4000 m, 面积约300万km²(海拔2500 m以上)(Zhang等, 2013), 被称为“世界屋脊”。青藏高原湖泊分布密集, 大于1 km²的湖泊有1400个左右, 面积约5.0万km², 约占中国湖泊数量与面积的一半(Ma等, 2011; Zhang等, 2019b, 2019c)。这些湖泊受人类活动的影响较小, 且多数位于封闭的内流区, 对气候与冰冻圈变化的响应极为迅速, 是研究圈层相互作用的重要纽带(Yang等, 2011; Yao等, 2015)。

青藏高原湖泊是气候变化的前哨, 其相关研

究是政府间气候变化专门委员会(IPCC)关注的内容之一(<https://www.ipcc.ch/srocc/> [2021-03-27])。近10 a, 主题同时包括lake、Tibetan Plateau、remote sensing关键词的论文数量与日俱增; 统计所有数据库发现近4 a的相关研究达到约50篇/a, 在Web of Science(<https://www.webofscience.com> [2021-03-27])核心合集中也达到约30篇/a(Zhang等, 2020a)(图1)。

以Tibetan Plateau、lake、remote sensing为必选关键词, lake area, lake level, lake volume, water balance, climate change, cryosphere, glacier, snow, permafrost, GRACE, hazard, precipitation, temperature, evaporation, lake ice, lake clarity, Landsat, ICESat, ICESat-2, Sentinel-2, Cryosat-2, GF为可选关键词, 组合检索青藏高原湖泊相关研究论文(94篇),

通过 Scopus 数据库 (<https://www.scopus.com> [2021-03-28]) 对其关键词统计分析可知 (图 2)，lake level、lake volume change、climate change、remote sensing 等为热点研究。

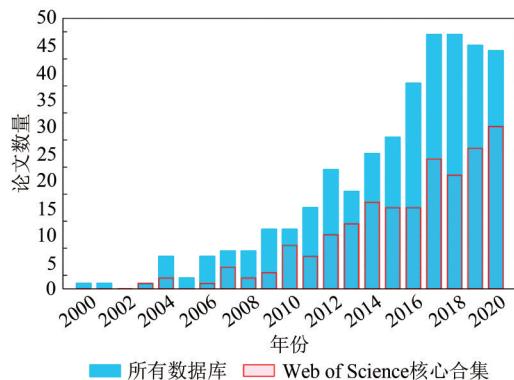


图1 2000年—2020年在Web of Science所有数据库和核心合集中检索的主题同时包括“lake”、“Tibetan Plateau”、“remote sensing”论文数量(修改自Zhang等(2020a))

Fig. 1 Number of papers on topics including “lake”, “Tibetan Plateau”, and “remote sensing” in all Web of Science databases and core collections from 2000 to 2020 (Revised from Zhang et al. (2020a)).

2 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化遥感监测方法

2.1 湖泊面积遥感监测

近年来，快速发展的遥感技术，大大推动了青藏高原湖泊变化研究（图3）。多光谱光学遥感影像，如Landsat MSS/TM/ETM+/OLI、高分系列卫星（GF-1、GF-2）、哨兵数据（Sentinel-2），可实现自1970s以来的湖泊制图（Zhang等，2017c；王文种等，2020）。特别是自2008年起，美国地质调查局（U.S. Geological Survey-USGS）免费提供的Landsat数据（Zhu等，2019），极大促进了高原湖泊的研究。此外，结合中国20世纪60年代到80年代纸质地形图，青藏高原湖泊制图可追溯至1960s（Wan等，2014；马荣华等，2011），目前对青藏高原湖泊数量与面积方面，已有较详细的研究，包括统计面积大于 1 km^2 的湖泊在20世纪60年代到2019年的多期变化（Ma等，2010；Wan等，2014；Zhang等，2014, 2019b）。

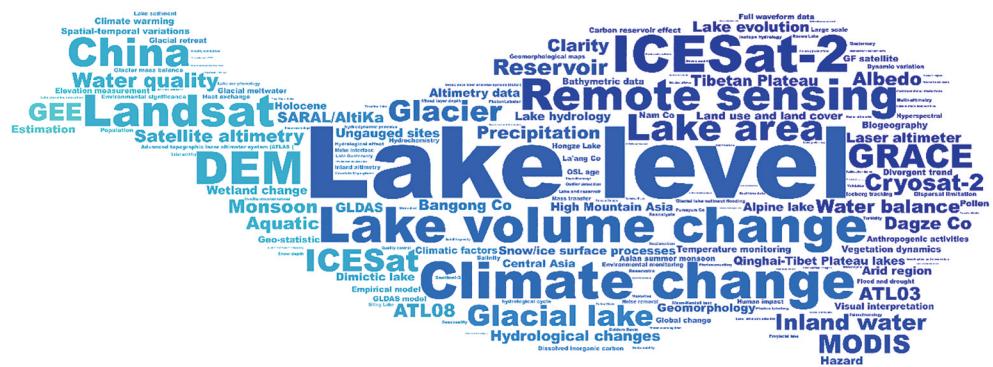


图2 青藏高原湖泊相关研究热度示意图(青藏高原边界为高于2500 m海拔高程范围)

Fig. 2 A diagram of the hotspot research related to lakes on the Tibetan Plateau (The boundary of Tibetan Plateau is delineated with altitude of higher than 2500 m a. s. l.)

青藏高原湖泊制图可利用的卫星遥感数据较多（如 Landsat，MODIS，Sentinel-2，高分），目前 Landsat 系列数据使用最为广泛，特别是 Landsat 8 卫星，其为监测湖泊面积变化提供了更多高质量的可利用数据（Ji 等，2018；Roy 等，2014）。湖泊水体信息提取的方法主要有专题分类法（Lira，2006），线性混合模型（Alcântara 等，2009），单波段阈值法（Jain 等，2005）和光谱水体指数法（Feyisa 等，2014），这些方法各有优缺点（Ji 等，2009）。通过对这些数据及方法的试验评估，普遍认为传统的归一化差异水体指数法 NDWI

(Normalized Difference Water Index) 在青藏高原水体信息提取效果较好 (Zhang 等, 2017a)。Landsat 数据已基本能提供每年一期的全覆盖高质量影像, 进而获取青藏高原湖泊稳定时期的面积数据 (10月份数据为最优选择, 如果 10 月无高质量数据, 可将数据扩展到 9 月和 11 月) (Zhang 等, 2017a)。首先将影像的灰度值 DN (Digital Number) 转化成表观反射率 TOA (Top of Atmosphere), 以校正不同数据之间的太阳天顶角差异 (Ji 等, 2009; Li 等, 2013; Yang 等, 2015); 其次结合 DEM 数据排除云和山体阴影干扰 (Li 和 Sheng, 2012; Zhu 等,

2015); 然后计算影像的归一化差异水体指数(NDWI); 最后使用全局—局部(李均力等, 2011; 骆剑承等, 2009) 阈值分割方法 Otsu 为每一个水

体单元自动选取最优阈值(Otsu, 1979), 快速准确地分离出水体信息(Zhang 等, 2017c)(图4)。

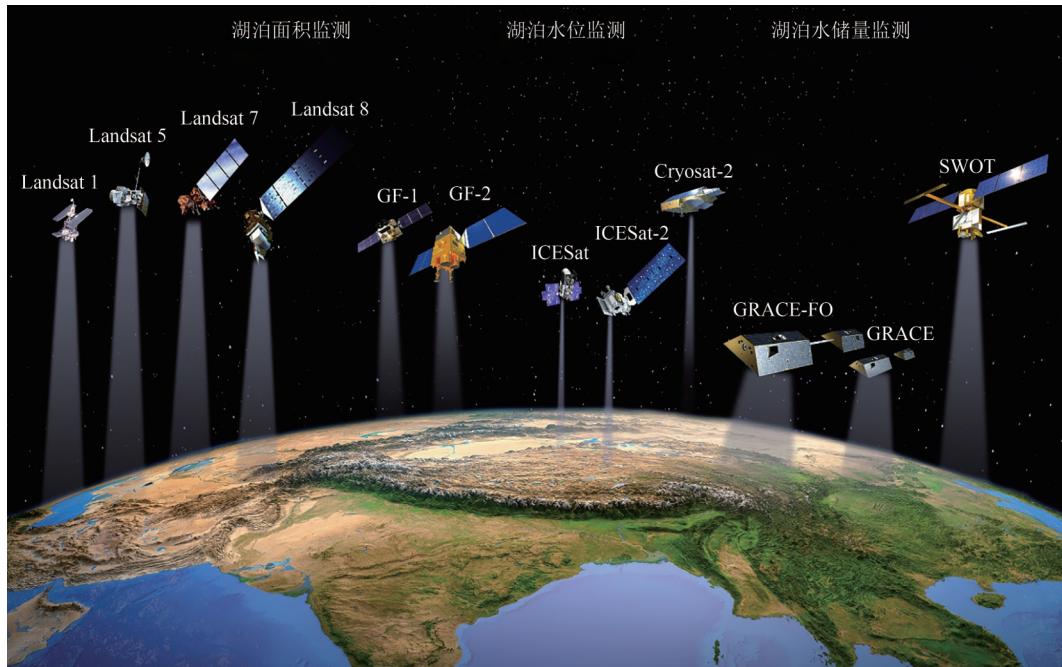


图3 青藏高原湖泊面积、水位与水量遥感监测应用示意图

Fig. 3 Satellite application diagram for remote sensing monitoring of lake area, water level and volume changes on the Tibetan Plateau

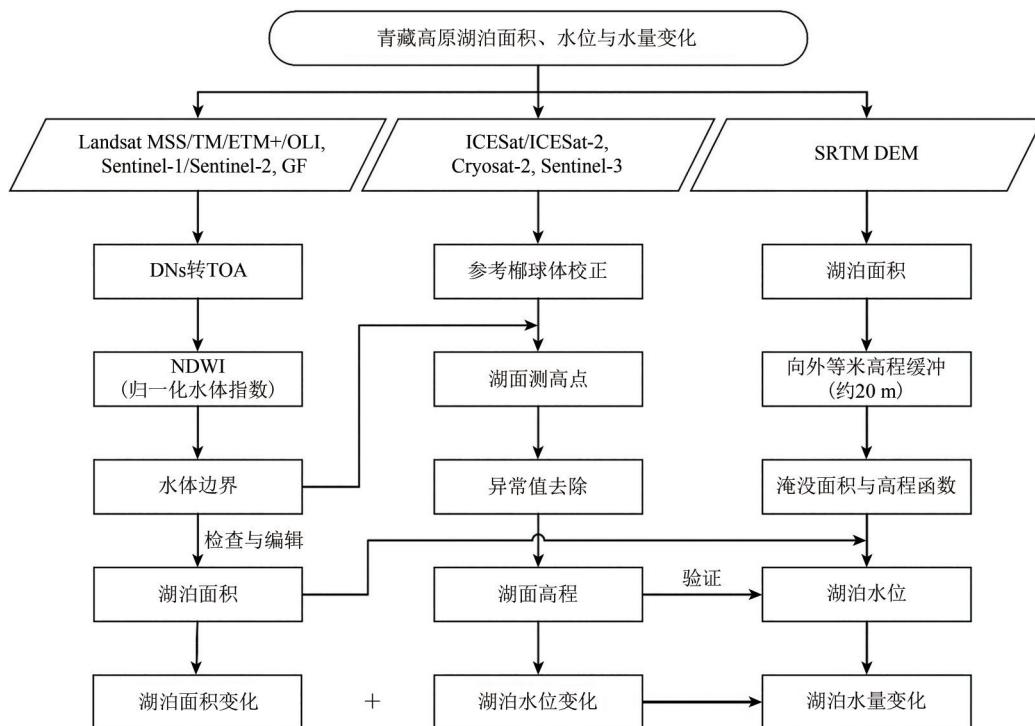


图4 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化遥感数据处理技术路线图

Fig. 4 Flowchart of remote sensing data processing of lake area, water level and volume changes on the Tibetan Plateau

在此基础上, 结合水库与大坝数据库、河流数据集、在线地图等排除非湖泊水体。再对照原

始影像对湖泊边界进行人工目视检查与校正, 快速、准确地完成湖泊制图。最后对每个湖泊进行

编号，完善湖泊属性表，并综合分析多期间湖泊数量与面积变化。对于新出现与消失的湖泊，应追踪多期多景遥感影像，核实其存在与消失状态，排除受季节变化影响或河道附近出现的间歇性水塘等的干扰。如在20世纪70年代到2010年间，结合多期影像，发现了99个新出现的湖泊（Zhang等，2014）。

2.2 湖泊水位遥感监测

青藏高原湖泊水位变化研究，早期使用水文站水位数据，仅青海湖有自1950s以来的长期连续水位观测记录（Li等，2007）。自2005年，中国科学院纳木错多圈层综合观测研究站，对纳木错进行了日水位观测，但在结冰期未能观测（有数据缺失）且记录的是相对水位变化。约2010年起，一些学者开始使用水位计对部分湖泊的水位进行观测（Lei等，2017），但仅限于10多个大湖，且是相对水位。雷达卫星测高数据（如Topex-Poseidon, GFO, ERS-2, Jason-1, Jason-2 and Envisat）可提供自1992年以来的湖泊水位绝对高程（Crétaux等，2011），但仅覆盖青藏高原20多个大湖。2003年发射的ICESat（the Ice, Cloud, and land Elevation Satellite）激光测高卫星，提供了史无前例的高精度测高数据，且增加了可监测湖泊数量（100个左右湖泊有可利用数据）（Phan等，2012；Zhang等，2011）。ICESat卫星于2010年停止运行，只提供了2003年—2009年共7 a的数据。2010年CryoSat-2卫星发射，青藏高原湖泊水位遥感监测得以延续（Jiang等，2017；Li等，2019a；廖静娟等，2020）；2016-02发射的Sentinel-3卫星，提供了更高时间分辨率的测高数据，为监测湖泊水位季节趋势和年内变化提供了可能（王文种等，2020）。另外，2018年发射的ICESat-2卫星，提供了更高精度的测高数据，且覆盖的湖泊数量更多（Cooley等，2021；Yuan等，2020；Zhang等，2019a）。

在青藏高原湖泊水位及变化遥感监测方面，精度较高的为激光测高数据ICESat/ICESat-2（Yuan等，2020；Zhang等，2011, 2019a），本论文只对ICESat和ICESat-2的数据处理进行简单介绍。通过美国国家冰雪数据中心（NSIDC）获取青藏高原ICESat/GLA14数据，ICESat高程数据参照的是Topex/Poseidon（T/P）椭球体及EGM96大地

水准面。具体方法：首先将T/P椭球体转换为WGS84椭球体，并使用ICESat提供的大地水准面参数（Geoid）对其校正；然后使用基于Landsat影像得到的湖泊边界来提取湖面测高点，通过统计分析去除极端异常值，每一条轨迹点的高程平均值为其湖面高程；最后通过线性拟合等方法，计算湖泊水位变化趋势。

ICESat-2于2018-09发射，激光点直径为约17 m，航向间距为约0.7 m（Markus等，2017）。ICESat-2 ATL13内陆水位高程产品（<https://nsidc.org/data/at13/versions/1> [2021-03-30]），在2018-09—2018-12可用的数据，覆盖湖泊面积约 $4.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ （占高原湖泊总面积的80%）（Zhang等，2019a）。另外，该产品提供了波高（SWH）参数可用以剔除波高对于湖面高程计算的影响。对于较大的湖泊，SWH的范围为0.05—0.75 m。ICESat-2的波长（552 nm），具有穿透水面的能力（Li等，2019b），因此接收到的信号中包含了水下后向散射信息，这部分信息占信号的较少部分；加之每个湖泊由于浊度差异和浅滩及近岸区域的散射、反射率不同，可能导致水面高程异常。采用简单的归一化中值绝对偏差NMAD（Normalized Median Absolute Deviation）方法（Höhle和Höhle，2009）来去除这些异常值。

利用ICESat（2003年—2009年）和ICESat-2（2018年—）湖泊水位，结合对应日期的湖泊面积，建立水位—面积关系。再基于此关系，利用Landsat观测到的湖泊面积，估算20世纪70年代到2018年间ICESat/ICESat-2观测期外的湖泊水位。

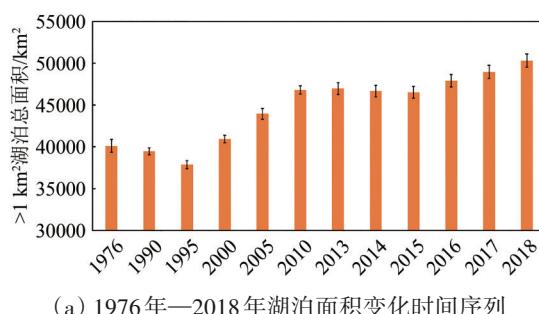
2.3 湖泊水量变化估算

青藏高原湖泊水量变化研究，通常结合湖泊面积与水位变化实现，然而这只能获得有测高数据时间段的湖泊水量变化（Zhang等，2013）。采用基于测高数据的湖泊水位与对应的基于光学数据的湖泊面积，建立两者间的关系，再利用更长时间段的湖泊面积，可扩展估算湖泊水量变化（Crétaux等，2016；Song等，2013；Zhang等，2017b）。另外，利用SRTM DEM的淹没面积—高程关系及青藏高原湖岸周边地形较平整特征，可实现对面积较大的湖泊（ $>50 \text{ km}^2$ ）（Yang等，2017）、甚至面积大于 1 km^2 湖泊水量变化的估算（Zhang等，2021）。

相较于使用激光或雷达测高数据，只能获

得面积较大湖泊的高程, 使用 SRTM DEM 数据, 可大大提高水量变化估算的湖泊数量。具体方法: 以 30 m SRTM DEM 数据为基础, 结合 Landsat/Sentinel-2 的湖泊面积, 采用区域生长法建立湖泊水位—面积关系。首先, 选择一期湖泊矢量边界对每个湖泊向外做缓冲区(根据近几十年来青藏高原湖泊面积扩张规律估算最大淹没面积), 确定每个湖泊 DEM 数据高程的搜索范围。再采用区域生长法, 选择湖泊覆盖范围 DEM 最低点作为种子生长点, 记录湖泊水位每升高 1 m, 所增加的像元数量, 初始生长终止条件为升高 20 m(根据目前青藏高原湖泊水位升高情况, 此阈值远远高于湖面最大升高量)(图 4); 接着, 进行九邻域最大值滤波, 去除不合理的积水点。然后, 统计各个高程所对应的湖面面积, 进行线性(或非线性)拟合得到高程-面积关系, 通过反复试验和验证确定最优拟合函数; 最后, 通过输入基于 Landsat/Sentinel-2 的湖泊面积, 进而得到各期湖泊对应的实际高程。结合湖泊面积与水位变化, 通过式(1), 计算湖泊水量变化:

$$\Delta V = \frac{1}{3} (H_2 - H_1) \times (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \times A_2}) \quad (1)$$



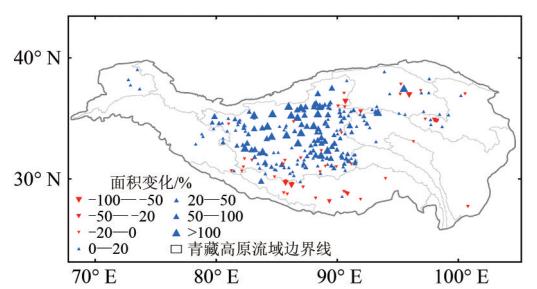
(a) 1976—2018 年湖泊面积变化时间序列
(a) Time series of lake area change from 1976 to 2018

式中, ΔV 为湖泊水量变化, H_1 与 A_1 、 H_2 与 A_2 分别为对应时期湖面高程与面积。

3 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化研究进展及分析

3.1 湖泊面积变化

利用多期 Landsat (MSS, TM, ETM+, OLI) 遥感数据, 完成了过去 50 a 最详细且密集的青藏高原湖泊数量与面积变化研究 ($>1 \text{ km}^2$ 湖泊)。使用 2000 年 14.25 m 全色的 Landsat 影像, 发现青藏高原有湖泊 32843 个 (Zhang 等, 2014)。青藏高原湖泊数量 ($>1 \text{ km}^2$) 从 1970s 的 1080 个增加到 2018 年的 1424 个 (32%)。相应地, 湖泊总面积从 4 万 km^2 增加到 5 万 km^2 , 净增加了 1 万 km^2 (25%) (Zhang 等, 2019b) (图 5)。青藏高原湖泊面积呈现快速但非线性增长模式, 即在 20 世纪 70 年代到 1995 年间, 大部分湖泊呈现萎缩状态; 但在 1995 年之后, 除 2015 年因受强厄尔尼诺事件影响降水减少导致的湖泊面积略有萎缩外, 青藏高原湖泊面积总体呈现出持续扩张态势 (Zhang 等, 2019b)。



(b) 1976—2018 年湖泊面积变化空间模式
(b) Spatial pattern of lake area change from 1976 to 2018
(Revised from Zhang et al. (2019b))

图 5 青藏高原湖泊面积变化
Fig. 5 Lake area change on the Tibetan Plateau

受青藏高原高云量影响 (Yu 等, 2016), 能够用来监测湖泊面积的光学遥感影像数据, 只能满足湖泊年尺度面积变化研究, 而无法满足对湖泊季节尺度的变化研究。使用不受云影响的 Sentinel-1 SAR 数据, 对大于 50 km^2 的湖泊月尺度面积进行了制图, 填补了青藏高原湖泊季节变化研究的空白 (Zhang 等, 2020b)。研究显示, 湖泊季节变化受规模大小、补给形式及大尺度大气环

流影响, 呈现出截然不同的变化模式: 相对较大湖泊 ($>100 \text{ km}^2$) 的面积在 8—9 月达到峰值, 而相对较小湖泊 ($50—100 \text{ km}^2$) 的面积在 6—7 月达到峰值; 封闭湖泊的面积季节峰值更突出, 而外流湖的季节峰值更平缓; 冰川补给湖相对于非冰川补给湖面积峰值延迟; 同时, 大尺度的大气环流, 如西风、印度季风和东亚季风也影响着湖泊面积的季节变化 (Zhang 等, 2020b)。

20世纪70年代到2018年过去50 a间,青藏高原湖泊面积变化总体呈现中—北部扩张、南部萎缩的空间差异。依据湖泊面积变化时间序列特点,将空间变化分为2个时间段:在20世纪70年代到1995年间,整个青藏高原湖泊面积萎缩;在1995年—2018年间,青藏高原湖泊总体扩张,但有明显的南北空间差异,即中—北部湖泊($>32^{\circ}$ N),特别是内流区扩张,而南部湖泊($<32^{\circ}$ N)萎缩(Zhang等,2019b)(图5)。

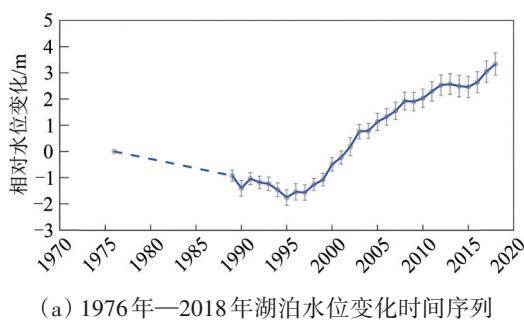
湖泊面积变化研究目前较多使用中等分辨率数据,高分辨率数据一般用来研究某个时期、较小湖泊的动态特征,由于可利用时间较短,较少用其研究湖泊长期趋势。

3.2 湖泊水位变化

利用ICESat数据(2003年—2009年)对青藏高原湖泊水位变化进行了监测,研究发现青藏高原湖泊水位快速升高(平均变化率为约0.21 m/a,共101个湖泊,总面积约2.8万km²,内流区湖泊数量与面积分别占比78%和67%)(Zhang等,2011,2013)。在此基础上,按湖泊补给方式,对湖泊水位变化进行了分类:封闭湖(约0.27 m/a,

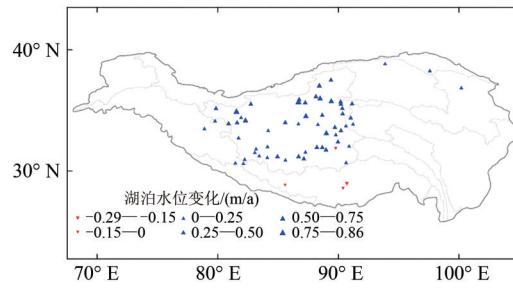
共71个湖泊,内流区湖泊数量与面积分别占比86%和70%)相对外流湖(约0.12 m/a)水位变化率更高;冰川补给湖(约0.24 m/a,共60个湖泊,内流区湖泊数量与面积分别占比80%和67%)与非冰川补给湖(约0.20 m/a)都显示出较高的水位变化率(Song等,2014; Zhang等,2017b)。对ICESat-2(2018年—)在青藏高原湖泊水位监测方面的表现进行了评估,结果表明ICESat-2具有精度高(与青海湖2018年对应日期的实测水位高程相比,误差仅为2 cm)和可利用数据多的优势。青藏高原有236个湖泊有ICESat-2可利用数据,相对于ICESat数据的132个,数量翻了一倍(Zhang等,2019a)。

1970s—2018年,青藏高原湖泊平均水位上升了约4 m(Zhang等,2020a)。湖泊水位在1976年—1995年略有降低,而在1995年—2018年间,除2015年略有降低外,总体快速升高(图6)(Zhang等,2020a)。湖泊水位变化的空间格局表现为:中—北部湖泊($>32^{\circ}$ N)水位上升明显,而南部湖泊($<32^{\circ}$ N),特别是雅鲁藏布江流域,水位总体下降。封闭湖、冰川补给湖、冰川补给封闭湖的水位变化南北差异更明显(Zhang等,2017b)(图6)。



(a) 1976年—2018年湖泊水位变化时间序列

(a) Time series of lake level changes from 1976 to 2018



(b) 2003年—2018年湖泊水位变化空间模式

(修改自(Zhang等,2020a))

(b) Spatial pattern of lake level changes from 2003 to 2018

(Revised from (Zhang et al., 2020a))

图6 青藏高原湖泊水位变化

Fig. 6 Lake level changes on the Tibetan Plateau

湖泊水位变化的研究,目前仍受限于测高数据有限的覆盖度和较短时间尺度。随着更多的测高卫星的发射,联合多源卫星测高数据,可实现对更多湖泊的年际水位变化趋势以及季节动态特征的研究。

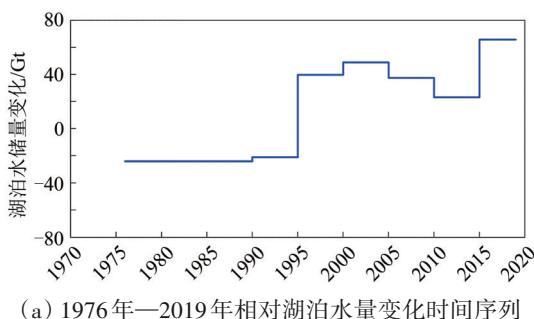
3.3 湖泊水量变化

使用ICESat和ICESat-2湖泊水位变化,只能估

算部分湖泊的水量变化(Song等,2013; Zhang等,2013,2019a)。利用SRTM DEM(30 m)数据,全面估算了1976年—2019年面积大于1 km²湖泊的水量变化(1132个)(Zhang等,2021)。总的来说,1976年—2019年,青藏高原湖泊水储量增加了约170 Gt,主要发生在内流区(158 Gt)。时间上,1976年—1995年,湖泊水量减少(约-45 Gt),

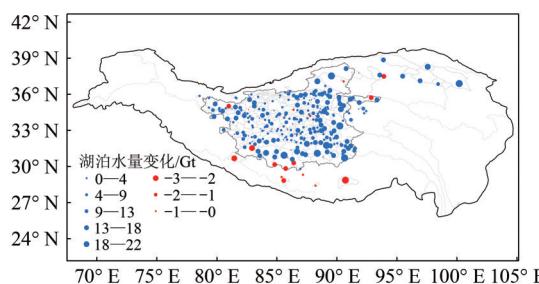
但在1995年—2019年,大幅增加(约215 Gt);2010年—2015年,水量增速减缓(约23 Gt),随后在2015年—2019年再次出现高值(约66 Gt)。湖泊分类上,在1976年—2019年,冰川补给湖水量增加(约127 Gt)远远高于非冰川补给湖(43 Gt),这也与冰川补给湖数量多,面积广有关;另外,封

闭湖水量增幅(约162 Gt)远远高于外流湖(约8 Gt)(图7)。空间上,湖泊水量变化与面积、水位变化空间格局相似,大部分中—北部湖泊水储量增加,少部分南部湖泊水储量减少;水量增加最快为色林错,可归因于其流域大、湖泊面积大及水位上升快。



(a) 1976年—2019年相对湖泊水量变化时间序列

(a) Time series of relative lake water volume changes from 1976 to 2019



(b) 1976年—2019年相对湖泊水量变化空间模式(湖泊水量变化估算以1976年为基准(修改自(Zhang等,2021)))

(b) Spatial pattern of relative lake water volume changes from 1976 to 2019(Lake water volume change estimation is based on 1976 (Revised from (Zhang et al., 2021))))

图7 青藏高原湖泊水量变化
Fig. 7 Lake water volume changes on the Tibetan Plateau

目前针对湖泊水量变化的研究,较多通过结合湖泊面积与卫星测高水位变化来实现,可估算水量变化的湖泊数量较少。使用数字高程模型反演湖岸地形可实现更多湖泊水量的估算,但其精度较雷达或激光测高数据低。

3.4 湖泊扩张原因分析

结合GRACE重力卫星数据,遥感监测的土壤水分、雪水当量、冰川物质平衡、冻土消融、湖泊水量变化等多种数据,对2003年—2009年青藏高原内流区质量平衡与湖泊水量平衡进行了估算(Zhang等,2017b)。研究表明,降水增强对湖泊水量增加贡献最大(约74%),其次为冰川消融(约13%)与冻土退化(约12%),雪水当量贡献较少(约1%)。更多定性分析(Lei等,2014; Song等,2014)、单个湖盆的水量平衡模型模拟(Biskop等,2016; Li等,2017; Zhou等,2015),及遥感监测的冰川质量损失对湖泊水量增加贡献的比例估算等(Brun等,2020; Zhang等,2021),均间接或直接地表明了降水增加是湖泊扩张的主要驱动因素,且远远大于冰川消融的贡献。

目前虽然已开展了一些湖泊变化原因的定性和定量研究,但受限于青藏高原面积广、气象站

点稀疏,特别是湖泊分布集中的青藏高原中—西部地区,各种再分析资料的降水和蒸发数据有着较大的不确定性,目前较难开展针对单个湖泊水量平衡的定量研究。

4 结语

青藏高原海拔高、环境恶劣、野外观测难度大。多源遥感数据的广泛使用,极大提高了人们对整个高原湖泊面积、水位与水量时空变化以及原因的宏观认识。然而,受限于遥感数据时空分辨率、天气与地形等自然环境的影响,目前对青藏高原湖泊的变化特征、成因与机制等的研究还存在很多不足,后续仍需结合新的卫星遥感数据、再分析资料、模型模拟、及野外观测不断向前推进。

(1) 湖泊季节变化。目前青藏高原湖泊面积与水位变化研究,主要聚焦于年际变化,季节变化研究较少,未来需结合多源遥感数据及新的算法,不断尝试理解湖泊年内季节变化,及对气候与冰冻圈变化的响应。

(2) 湖泊变化原因定量估算。目前湖泊变化原因,较定量的研究为冰川质量损失对湖泊水量增加的贡献,而降水、蒸发、冻土地下冰消融对

湖泊水量增加贡献如何，还需发展新的驱动数据集，并从流域尺度进一步结合水文模拟，估算湖泊水量平衡的收支各项。

(3) 湖泊变化的驱动机制。青藏高原湖泊变化的驱动机制目前主要是对高原降水增强的机制分析 (Liu等, 2019; Sun等, 2020)，未来还需结合气候动力学理论和水文模型，进一步提升对气候系统与冰冻圈影响青藏高原湖泊时空变化差异驱动机制的认识。

(4) 认识青藏高原湖泊的过去、现在与未来，离不开卫星遥感技术。遥感作为空一天一地不可或缺的现代技术手段，随着第二次青藏高原综合科学考察研究项目的实施，将发挥更大的作用，更多新的卫星陆续发射，将帮助人们提高对青藏高原湖泊演化规律与变化机制的认识。

参考文献(References)

- Alcántara E, Barbosa C, Stech J, Novo E and Shimabukuro Y. 2009. Improving the spectral unmixing algorithm to map water turbidity Distributions. *Environmental Modelling and Software*, 24(9): 1051-1061 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.02.013]
- Biskop S, Maussion F, Krause P and Fink M. 2016. Differences in the water-balance components of four lakes in the southern-central Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1): 209-225 [DOI: 10.5194/hess-20-209-2016]
- Brun F, Treichler D, Shean D and Immerzeel W W. 2020. Limited contribution of glacier mass loss to the recent increase in Tibetan Plateau lake volume. *Frontiers in Earth Science*, 8: 582060 [DOI: 10.3389/feart.2020.582060]
- Cooley S W, Ryan J C and Smith L C. 2021. Human alteration of global surface water storage variability. *Nature*, 591(7848): 78-81 [DOI: 10.1038/s41586-021-03262-3]
- Crétaux J F, Abarca-Del-Rio R, Bergé-Nguyen M, Arsen A, Drolon V, Clos G and Maisongrande P. 2016. Lake volume monitoring from space. *Surveys in Geophysics*, 37(2): 269-305 [DOI: 10.1007/s10712-016-9362-6]
- Crétaux J F, Arsen A, Calmant S, Kouraev A, Vuglinski V, Bergé - Nguyen M, Gennero M C, Nino F, Abarca Del Rio R, Cazenave A and Maisongrande P. 2011. SOLS: a lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in Space Research*, 47(9): 1497-1507 [DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.004]
- Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R and Proud S R. 2014. Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140: 23-35 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029]
- Höhle J and Höhle M. 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4): 398-406 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003]
- Jain S K, Singh R D, Jain M K and Lohani A K. 2005. Delineation of flood-prone areas using remote sensing techniques. *Water Resources Management*, 19(4): 333-347 [DOI: 10.1007/s11269-005-3281-5]
- Ji L, Zhang L and Wylie B. 2009. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(11): 1307-1317 [DOI: 10.14358/PERS.75.11.1307]
- Ji L Y, Gong P, Wang J, Shi J C and Zhu Z L. 2018. Construction of the 500-m resolution daily global surface water change database (2001-2016). *Water Resources Research*, 54(12): 10270-10292 [DOI: 10.1029/2018WR023060]
- Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat-2 SARIn mode data. *Journal of Hydrology*, 544: 109-124 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.024]
- Lei Y B, Yang K, Wang B, Sheng Y W, Bird B W, Zhang G Q and Tian L D. 2014. Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change. *Climatic Change*, 125(2): 281-290 [DOI: 10.1007/s10584-014-1175-3]
- Lei Y B, Yao T D, Yang K, Sheng Y W, Kleinherenbrink M, Yi S, Bird B W, Zhang X W, Zhu L and Zhang G Q. 2017. Lake seasonality across the Tibetan Plateau and their varying relationship with regional mass changes and local hydrology. *Geophysical Research Letters*, 44(2): 892-900 [DOI: 10.1002/2016GL072062]
- Li B Q, Zhang J Y, Yu Z B, Liang Z M, Chen L and Acharya K. 2017. Climate change driven water budget dynamics of a Tibetan inland lake. *Global and Planetary Change*, 150: 70-80 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2017.02.003]
- Li J L and Sheng Y W. 2012. An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: a case study in the Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 33(16): 5194-5213 [DOI: 10.1080/01431161.2012.657370]
- Li J L, Sheng Y W and Luo J C. 2011. Automatic extraction of himalayan glacial lakes with remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 15(1): 29-43 (李均力, 盛永伟, 骆剑承. 2011. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取. 遥感学报, 15(1): 29-43) [DOI: 10.11834/jrs.20110103]
- Li W B, Du Z Q, Ling F, Zhou D B, Wang H L, Gui Y M, Sun B Y and Zhang X M. 2013. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI. *Remote Sensing*, 5(11): 5530-5549 [DOI: 10.3390/rs5115530]
- Li X D, Long D, Huang Q, Han P F, Zhao F Y and Wada Y. 2019a. High-temporal-resolution water level and storage change data sets

- for lakes on the Tibetan Plateau during 2000-2017 using multiple altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions. *Earth System Science Data*, 11(4): 1603-1627 [DOI: 10.5194/esd-11-1603-2019]
- Li X Y, Xu H Y, Sun Y L, Zhang D S and Yang Z P. 2007. Lake-level change and water balance analysis at lake Qinghai, west China during recent decades. *Water Resources Management*, 21(9): 1505-1516 [DOI: 10.1007/s11269-006-9096-1]
- Li Y, Gao H L, Jasinski M F, Zhang S and Stoll J D. 2019b. Deriving high-resolution reservoir bathymetry from ICESat-2 prototype photon-counting Lidar and landsat imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10): 7883-7893 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2917012]
- Lira J. 2006. Segmentation and morphology of open water bodies from multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 27(18): 4015-4038 [DOI: 10.1080/01431160600702384]
- Liao J J, Xue H and Chen J M. 2020. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau from 2000 to 2018 using satellite altimetry data. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 24(12): 1534-1547 (廖静娟, 薛辉, 陈嘉明. 2020. 卫星测高数据监测青藏高原湖泊2010年-2018年水位变化. 遥感学报, 24(12): 1534-1547) [DOI: 10.11834/jrs.20209281]
- Liu Y, Chen H P, Zhang G Q, Sun J Q and Wang H J. 2019. The advanced South Asian monsoon onset accelerates lake expansion over the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 64(20): 1486-1489 [DOI: 10.1016/j.scib.2019.08.011]
- Luo J C, Sheng Y W, Shen Z F, Li J L and Gao L J. 2009. High precision automatic extraction of multi-spectral remote sensing water information by step iteration. *Journal of Remote Sensing*, 13(4): 610-615 (骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 李均力, 鄂丽静. 2009. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取. 遥感学报, 13(4): 610-615) [DOI: 10.11834/jrs.20090405]
- Ma R H, Duan H T, Hu C M, Feng X Z, Li A N, Ju W M, Jiang J H and Yang G S. 2010. A half-century of changes in China's lakes: global warming or human influence? *Geophysical Research Letters*, 37(24): L24106 [DOI: 10.1029/2010gl045514]
- Ma R H, Yang G S, Duan H T, Jiang J H, Wang S M, Feng X Z, Li A N, Kong F X, Xue B, Wu J L and Li S J. 2010. China's lakes at present: number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 283-289 (马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 姜加虎, 王苏民, 冯学智, 李爱农, 孔繁翔, 薛滨, 吴敬禄, 李世杰. 2011. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 41(3): 394-401) [DOI: 10.1007/s11430-010-4052-6]
- Markus T, Neumann T, Martino A, Abdalati W, Brunt K, Csatho B, Farrell S, Fricker H, Gardner A, Harding D, Jasinski M, Kwok R, Magruder L, Lubin D, Luthcke S, Morison J, Nelson R, Neuenchwander A, Palm S, Popescu S, Shum C K, Schutz B E, Smith B, Yang Y K and Zwally J. 2017. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, 190: 260-273 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.029]
- Otsu N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62-66 [DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076]
- Phan V H, Lindenbergh R and Menenti M. 2012. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 17: 12-22 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.09.015]
- Roy D P, Wulder M A, Loveland T R, Woodcock C E, Allen R G, Anderson M C, Helder D, Irons J R, Johnson D M, Kennedy R, Scambos T A, Schaaf C B, Schott J R, Sheng Y, Vermote E F, Belward A S, Bindschadler R, Cohen W B, Gao F, Hippel J D, Hostert P, Huntington J, Justice C O, Kilic A, Kovalevskyy V, Lee Z P, Lymburner L, Masek J G, McCorkel J, Shuai Y, Trezza R, Vogelmann J, Wynne R H and Zhu Z. 2014. Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145: 154-172 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001]
- Song C Q, Huang B and Ke L H. 2013. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 135: 25-35 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.013]
- Song C Q, Huang B, Richards K, Ke L H and Phan V H. 2014. Accelerated lake expansion on the Tibetan Plateau in the 2000s: induced by glacial melting or other processes? *Water Resources Research*, 50(4): 3170-3186 [DOI: 10.1002/2013WR014724]
- Sun J, Yang K, Guo W D, Wang Y, He J and Lu H. 2020. Why has the Inner Tibetan Plateau become wetter since the mid-1990s? *Journal of Climate*, 33(19): 8507-8522 [DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0471.1]
- Wang S M and Dou H S. 1998. *Chinese Lakes Inventory*. Science Press, Beijing, China (王苏民, 窦鸿身. 1998. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社)
- Wan W, Xiao P F, Feng X Z, Li H, Ma R H, Duan H T and Zhao L M. 2014. Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data. *Chinese Science Bulletin*, 59(10): 1021-1035 [DOI: 10.1007/s11434-014-0128-6]
- Wang W Z, Huang D, Liu J F, Liu H W and Wang H. 2020. 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. *Journal of Lake Sciences*, 32(5): 1552-1563 (王文种, 黄对, 刘九夫, 刘宏伟, 王欢. 2020. 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. 湖泊科学, 32(5): 1552-1563) [DOI: 10.18307/2020.0526]
- Yang K, Ye B S, Zhou D G, Wu B Y, Foken T, Qin J and Zhou Z Y. 2011. Response of hydrological cycle to recent climate changes in

- the Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 109(3): 517-534 [DOI: 10.1007/s10584-011-0099-4]
- Yang R M, Zhu L P, Wang J B, Ju J T, Ma Q F, Turner F and Guo Y. 2017. Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013. *Climatic Change*, 140(3/4): 621-633 [DOI: 10.1007/s10584-016-1877-9]
- Yang Y H, Liu Y X, Zhou M X, Zhang S Y, Zhan W F, Sun C and Duan Y W. 2015. Landsat 8 OLI image based terrestrial water extraction from heterogeneous backgrounds using a reflectance homogenization approach. *Remote Sensing of Environment*, 171: 14-32 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.005]
- Yao T D, Wu F Y, Ding L, Sun J M, Zhu L P, Piao S L, Deng T, Ni X J, Zheng H B and Ouyang H. 2015. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: a review of the recent researches. *National Science Review*, 2(4): 468-488 [DOI: 10.1093/nsr/nwv070]
- Yu J Y, Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Zhang H B, Ke C Q and Yao R Z. 2016. Developing daily cloud-free snow composite products from MODIS Terra-Aqua and IMS for the Tibetan Plateau. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4): 2171-2180 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2496950]
- Yuan C, Gong P and Bai Y Q. 2020. Performance assessment of ICE-Sat-2 Laser altimeter data for water-level measurement over lakes and reservoirs in China. *Remote Sensing*, 12(5): 770 [DOI: 10.3390/rs12050770]
- Zhang G Q, Bolch T, Chen W F and Crétaux J F. 2021. Comprehensive estimation of lake volume changes on the Tibetan Plateau during 1976-2019 and basin-wide glacier contribution. *Science of the Total Environment*, 772: 145463 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145463]
- Zhang G Q, Chen W F and Xie H J. 2019a. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and Landsat missions. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 13107-13118 [DOI: 10.1029/2019GL085032]
- Zhang G Q, Li J L and Zheng G X. 2017a. Lake-area mapping in the Tibetan Plateau: an evaluation of data and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 38(3): 742-772 [DOI: 10.1080/01431161.2016.1271478]
- Zhang G Q, Luo W, Chen W F and Zheng G X. 2019b. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 64(18): 1306-1309 [DOI: 10.1016/j.scib.2019.07.018]
- Zhang G Q, Xie H J, Kang S C, Yi D H and Ackley S F. 2011. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009). *Remote Sensing of Environment*, 115(7): 1733-1742 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.005]
- Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, Zheng G X, Shum C K, Yang K, Piao S L, Sheng Y W, Yi S, Li J L, O'Reilly C M, Qi S H, Shen S S P, Zhang H B and Jia Y Y. 2019c. Regional differences of lake evolution across China during 1960s - 2015 and its natural and anthropogenic causes. *Remote Sensing of Environment*, 221: 386-404 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.038]
- Zhang G Q, Yao T D, Shum C K, Yi S, Yang K, Xie H J, Feng W, Bolch T, Wang L, Behrangi A, Zhang H B, Wang W C, Xiang Y and Yu J Y. 2017b. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. *Geophysical Research Letters*, 44(11): 5550-5560 [DOI: 10.1002/2017GL073773]
- Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Kang S C and Lei Y B. 2013. Increased mass over the Tibetan Plateau: from lakes or glaciers? *Geophysical Research Letters*, 40(10): 2125-2130 [DOI: 10.1002/grl.50462]
- Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Yang K, Zhu L P, Shum C K, Bolch T, Yi S, Allen S, Jiang L G, Chen W F and Ke C Q. 2020a. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: trends, patterns, and mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 208: 103269 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103269]
- Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Zhang K X and Zhu F J. 2014. Lakes' state and abundance across the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 59(24): 3010-3021 [DOI: 10.1007/s11434-014-0258-x]
- Zhang G Q, Zheng G X, Gao Y, Xiang Y, Lei Y B and Li J L. 2017c. Automated water classification in the Tibetan Plateau using Chinese GF-1 WFV data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 83(7): 509-519 [DOI: 10.14358/PERS.83.7.509]
- Zhang Y, Zhang G Q and Zhu T T. 2020b. Seasonal cycles of lakes on the Tibetan Plateau detected by Sentinel-1 SAR data. *Science of the Total Environment*, 703: 135563 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135563]
- Zhou J, Wang L, Zhang Y S, Guo Y H, Li X P and Liu W B. 2015. Exploring the water storage changes in the largest lake (Selin Co) over the Tibetan Plateau during 2003-2012 from a basin-wide hydrological modeling. *Water Resources Research*, 51(10): 8060-8086 [DOI: 10.1002/2014WR015846]
- Zhu Z, Wang S X and Woodcock C E. 2015. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment*, 159: 269-277 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.014]
- Zhu Z, Wulder M A, Roy D P, Woodcock C E, Hansen M C, Radeloff V C, Healey S P, Schaaf C, Hostert P, Strobl P, Pekel J F, Lymanburner L, Pahlevan N and Scambos T A. 2019. Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sensing of Environment*, 224: 382-385 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.016]

Progress in remote sensing monitoring of lake area, water level, and volume changes on the Tibetan Plateau

ZHANG Guoqing¹, WANG Mengmeng^{1,2}, ZHOU Tao^{1,2}, CHEN Wenfeng^{1,2}

1. State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Resources and Environment, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Lakes are very sensitive to the impacts of climate change and human activities. The lakes over the Tibetan Plateau (TP) are numerous and extensively distributed; they are an important part of the Asian water towers. Understanding the interactions of the Earth system's circles and the mechanism of environmental changes on the TP requires less disturbance from human activities. What is the response of TP's lakes to climate change as sensitive indicators in the context of rapid global warming? Based on the lake area mapping with multispectral images, lake water level changes from satellite altimetry data, and lake water volume changes with digital elevation model. This study synthesizes the research progress of area, level, and water volume changes of lakes (larger than 1 km²) on the TP in the past nearly 50 years. The main conclusions are as follows: (1) the total number of lakes on the TP increased from 1080 in the 1970s to 1424 in 2018 (+32%), the total lake area expanded from 40,000 km² to 50,000 km² (+25%), the average water level of lakes increased by approximately 4 m, and the lake water storage increased by nearly 170 billion tons. (2) The changes in lake area, water level, and water volume decreased slightly from the 1970s to 1995, and then showed a rapid but nonlinear increase. The lake area, water level, and volume increased in the north-central plateau but decreased in the south. (3) A quantitative lake water balance based on multisource remote sensing data reveals that increased precipitation is the main driver of lake expansion, followed by glacier ablation contribution. Several scientific frontiers facing the challenge are also summarized as follows: (1) quantitative evaluation of the causes of individual lake change. At present, a quantitative study on the causes of lake change indicates the contribution of glacial mass loss to the increase in lake water volume, and precipitation, evaporation, and permafrost underground ice ablation that contribute to the increase in lake water. New driving data sets should be developed and hydrological models from the watershed scale should be further combined to estimate lake water balance. (2) Driving mechanisms of lake changes. The driving mechanisms of lake changes on the TP are currently analyzed mainly to enhance precipitation on the plateau. In the future, climate dynamics theory and hydrological models should be combined to further improve understanding of the driving mechanisms of spatial and temporal differences between the climate system and the cryosphere affecting lake changes on the TP. (3) New satellite remote sensing technology should be combined to understand the past, present, and future lake evolution on the TP. Remote sensing, as an indispensable modern technical means of air-sky-earth, plays a greater role with the implementation of the Second TP Scientific Expedition and Research plan on the TP, and more new satellites are launched one after another to improve understanding of the evolution pattern and change mechanism of lakes on the TP.

Key words: lake, remote sensing, area, level, volume, Tibetan Plateau

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41871056, 41831177)