

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0110

CHEN Jun, LIU Yanzhao, CAO Liguang, 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. [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.]

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

陈 军^{1,2}, 刘延昭^{1,2}, 曹立国^{2,3}, 胡建茹^{1,2}, 刘水林¹

(1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230000; 2. 安徽省智慧城市工程技术研究中心, 安徽 合肥 230000;
3. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 青藏高原湖泊是气候变化的重要指示器, 20 世纪 90 年代中期以来, 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。值得注意的是, 湖泊水位变化的空间分布特征和西风带及印度季风带影响区的降水量变化具有高度的空间一致性。严酷的自然环境导致对青藏高原内陆湖泊的实地观测变得难以企及, 而遥感技术的发展正好可以克服以上局限, 该技术已经成为青藏高原湖泊变化监测的主要研究手段。本文围绕遥感监测技术与方法, 综述了青藏高原湖泊面积、水量、冰物候、水体参数以及水量平衡定量估算等方面的研究进展。部分研究以流域为尺度应用多源遥感与水文模型进行水量平衡定量评估, 结果表明青藏高原内陆地区的湖泊水量增加的主要贡献因素是降水增多, 而冰川融化、冻土消融及其他因素的贡献程度却相对较小。当前, 学术界一般认为: 大尺度的降水年代际变化是青藏高原湖泊近期变化的主要原因, 而冰川冻土加速消融又进一步加速湖泊扩张或抑制了部分湖泊收缩。过去, 关于青藏高原湖泊变化的气候响应机制研究大多停留在对降水、蒸发、温度、风速、冰冻圈融化等气候因素的定性描述上; 现在, 在湖泊水量平衡方面, 越来越多的研究开始在定量化方面取得进展; 将来, 随着更多遥感数据的开放共享, 以及更多水文与气象站点的投入使用, 将为青藏高原湖泊的水量平衡定量研究提供更好的数据条件。

关键词: 湖泊; 遥感; 青藏高原; 水量平衡; 研究进展

中图分类号: P332.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)04-1203-13

0 引言

青藏高原被称为“世界屋脊”和“世界第三极”, 平均海拔超过 4 000 m, 分布着 1 000 多个面积大于 1 km² 的高山湖泊^[1], 这些湖泊是构成青藏高原水圈的重要部分。青藏高原还是亚洲主要河流的发源地, 被誉为“亚洲水塔”, 为东亚及南亚超过 20 亿人口供应水源^[2]。因其偏远的地理位置极少受到人类活动的影响, 所以青藏高原湖泊的动态变化能够真实地反映其所处区域的气候变化状况及发展趋势, 是气候变化的指示器^[3]。青藏高原在过去的 50 年中表现出持续的升温态势, 导致了冰川退缩和多年

冻土消融^[4], 与之相伴的气候变化特征还有藏北西风区的降水量增加和藏南西南季风区的降水量减少。青藏高原的气温和降水量变化对湖泊演变甚至高原水循环产生了深远的影响^[5-6]。具体而言, 1990 年之前, 西风带影响区域降水减少, 而且同时期气温下降抑制冰川融水, 使得青藏高原内陆湖泊水位持续降低^[7]。1990—2000 年间, 温度升高导致补给冰川持续消融, 打破了高原湖泊补给状态原有的稳定, 进而导致湖泊水位升高。2000 年之后, 降水对湖泊水位起着正效应作用。然而, 2005—2013 年间, 随着气温变暖的持续, 该时段蒸散量的增加

收稿日期: 2022-01-07; 修订日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901129); 安徽建筑大学博士启动基金项目(2018QD15)资助

作者简介: 陈军, 副教授, 主要从事遥感地学分析、资源环境遥感等研究. E-mail: gischen@126.com

通信作者: 刘延昭, 硕士研究生, 主要从事自然地理、市政工程等研究. E-mail: liuyanzhao286910@163.com

对湖泊水量增长速率起到削弱作用^[5,8]。总体来说,过去几十年青藏高原湖泊水位变化的空间分布特征和西风带及印度季风带影响区的降水量变化具有高度的空间一致性^[8]。

目前,学术界基本认可大尺度的降水年代际变化是羌塘高原及青藏高原东北部湖泊扩张、南部湖泊收缩的主因。与此同时,冰川冻土退化又进一步

加速湖泊扩张或抑制了部分湖泊收缩。由于缺乏可靠的观测数据,很难准确量化青藏高原降水量变化和冰冻圈物质平衡对湖泊水量平衡的贡献程度。要回答这个科学问题,需要对整个青藏高原更多湖泊水量平衡的定量估算,评估冰川融水、降水、冻土消融、蒸发和风速等因素对湖泊水量变化的贡献^[9]。青藏高原湖泊和冰川分布如图1。

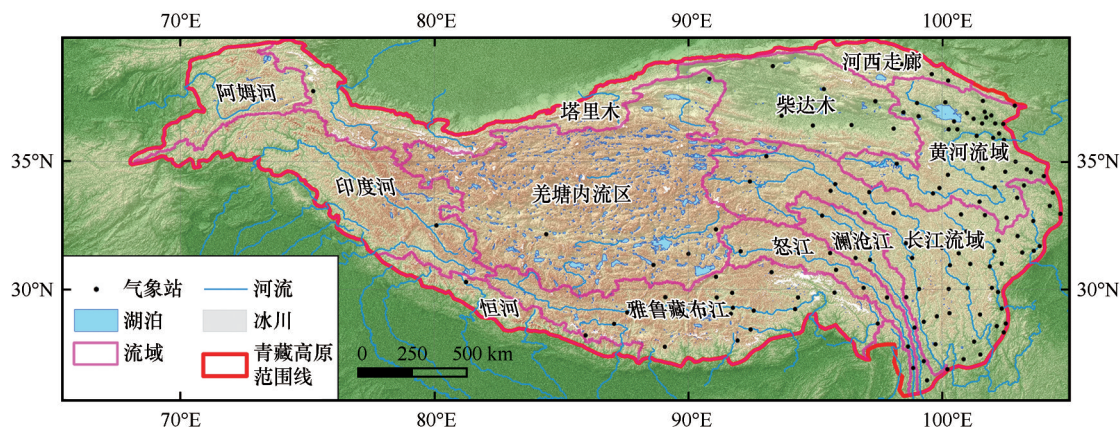


图1 青藏高原湖泊和冰川分布图^[10]

Fig. 1 Topographic map of the Qinghai-Tibet Plateau and distribution of lakes and glaciers^[10]

1 基于多源遥感数据的青藏高原湖泊变化监测

较小的人类活动和恶劣的自然环境导致青藏高原地面观测数据空间分布有限,且实测精度和效率大大降低,这种局限却反而为湖泊变化遥感监测技术发展提供了绝好的应用场景。

1.1 基于多源遥感数据的青藏高原湖泊面积变化

基于光学影像的水体信息自动提取常用算法有单波段阈值法^[11]、水体指数法^[12]、谱间关系法^[13]等。单波段阈值法操作简便,适用于较大范围或平原地区的水体自动提取,但该方法难以消除植被、阴影等噪声,且阈值选择容易受人为主观影响,精度较低;谱间关系法效果稳定,可识别复杂地物,较好地 将阴影区和水体分开,适用于复杂地形的水体信息提取,但该算法涉及较多的逻辑判断且操作繁杂。水体范围图像分类的传统方法主要包括监督分类和非监督分类。当前,色度判别法、决策树分类以及机器学习算法等新分类方法也被广泛使用^[14]。多源遥感数据的融合可以提高水体识别的准确性,如融合光学影像和合成孔径雷达(SAR)数据,可以同时利用光学影像具有资源丰富和SAR数据几乎不受云雨天气影响的优点。实践表明:针对

分布密集的青藏高原内陆湖泊,人工目视检查辅助下的水体自动分类与编辑是湖泊水体信息提取的最优方法^[9]。在湖泊范围变化监测数据源使用方面,从低分辨率的NOAA影像,到中等分辨率的MODIS影像,以及高分辨率的Landsat、SPOT影像,再到亚米级的Quickbird、WorldView和IKONOS影像,以及我国的高分系列卫星影像等都被广泛应用(表1)。不同时、空分辨率的光学影像在监测青藏高原湖泊范围应用中各具优势:空间分辨率高的影像能够监测细部变化,而时间分辨率高的影像能够监测短期变化。因此,为充分发挥不同类型数据的优势和特点,联合多种数据源能够有效提高青藏高原湖泊范围变化监测效果。

王苏民等^[15]详细对比1960—1980年间的地形图发现,青藏高原 $>1\text{ km}^2$ 的湖泊数量有1 081个,总面积约为 $45\ 000\text{ km}^2$ 。Zhang等^[10]利用Landsat影像,对过去40年来青藏高原面积大于 1 km^2 的湖泊数量和面积变化及其对气候变化的响应进行研究,湖泊面积 $>1\text{ km}^2$ 的湖泊数量,从1976年的1 080个增加到2018年的1 424个,湖泊面积增大了约25.4%。值得注意的是,1970—1990s中期,大多数湖泊都呈现出萎缩趋势,随着青藏高原的持续增温以及局地降水增加,1990s中期开始,湖泊基本上转

表 1 青藏高原湖泊遥感监测常用传感器一览表^[3]

Table 1 Characteristics of satellites and sensors usually applied in lake studies in Qinghai-Tibet Plateau^[3]

用途	卫星	传感器	运行时间	分辨率	重返周(天)
水域提取	NOAA/TIROS	AVHRR	1978 年至今	1 001 m	1
	TERRA	MODIS	1999 年至今	250 m/1 000 m	1
	AQUA	MODIS	2003 年至今	250 m/1 000 m	1
	Landsat (1~8)	MSS	1972—1983 年	80 m	16
		TM	1982—1999 年	30 m	16
		ETM	1999—2013 年	15/30/60 m	16
		OLI	2013 年至今	15/30/100 m	16
	CBERS	CCD	1999 年至今	19. 5 m	16
	TERRA	ASTER	1999 年至今	15/30/90 m	16
	Sentinel-2	MSI	2015 年至今	10/20/60 m	10
	SPOT-1~7	Pan/MS/SWI Multispectral	1986 年至今	1/2. 5/5/10/20 m	26
	Quickbird	BGIS2000	2001 年至今	亚米级	6
	IKONOS	Pan/MS Multispectral	1999 年至今	亚米级	3
	中国高分系列卫星	—	2013 年至今	米/亚米级	—
水位提取	ERS-1/2	RA	1991—2003 年	~7 km	35
	ENVISAT	RA-2	2002—2008 年	2~10 km	35
	TOPEX/Poseiden	Poseidon	1992—2006 年	~5 km	10
	Jason-1/2/3	Poseidon2	2001 年至今	~5 km	10
	Cryosat-2	SIRAL	2010 年至今	300 m	369
	Sentinel-3	SRAL	2016 年至今	320 m	4
	ICESat-1/2	GLAS	2003—2009 年, 2018 年至今	70 m	8
水体参数提取	Nimbus-7	SMMR, SSM/I	1978 年至今	825 m	5~6
	ERS-1/2	SAR	1991—2003 年	10 m (1)×1 m (w)	—
	TERRA/AQUA	MODIS	1999/2000 年至今	250/1 000 m	1
	ENVISAT	MERIS	2002—2012 年	300 m	3

入扩张状态。特别是在 2000 年以后,这种扩张幅度显得尤为剧烈。但接下来的 2005—2013 年期间,扩张速度有所减缓,而近年来又出现扩张加速的现象^[16](图 2)。与湖泊面积变化相关的是湖泊数量的变化:在 1970—1990 年,面积>1 km²的湖泊数量略有减少,伴随着湖泊面积在 1990—2010 年间的扩张,湖泊数量在 1990—2010 年期间也呈现显著增加趋势。青藏高原湖泊变化的时间特征还体现在显著的季节差异上,导致季节差异的原因除了降水季节分配不均之外,还有就是冰川、冻土融化主要发生在温暖的夏季。综上,青藏高原绝大部分的湖泊春夏季处于丰水期,而秋冬季处于枯水期^[17]。

1.2 基于多源遥感数据的青藏高原湖泊水位及水量变化

青藏高原湖泊因其地处偏远和气象恶劣,在地表设置人工水文站点进行长期监测较为困难,目前只有青海湖(1959—)、纳木错(2005—)和羊卓雍错(1974—)有长期连续的水位观测^[18]。但是这些有

限的实测水位信息对验证遥感数据的精度具有重要作用。卫星测高技术的发展,为大范围、周期性监测湖泊水位变化提供了技术支持。目前常用的卫星测高数据主要包括雷达高度计(ENVISAT、Cryosat-2、TOPEX/Poseiden、Sentinel-3 等)和激光高度计(ICESat-1/2 等)两大类。相对于雷达测高,激光测高精度更高,可以监测面积较小的湖泊水位^[19]。而卫星雷达测高数据的优点是覆盖的时间跨度更长,而且不易受到云雪天气的影响。因此在长时间序列监测青藏高原面积较大的湖泊方面,卫星雷达测高发挥了重要的作用。青藏高原湖泊水域环境复杂,测高卫星常伴有可用性数据缺失或信息失真,通过改进数据处理方法能有效改善测高精度^[20]。融合多种卫星测高数据,如 Song 等^[21-22]联合 ICESat-1 和 CryoSat-2 两种卫星测高数据,不仅可以获得更长时间序列的水位信息,还可提高水位获取信息的时空分辨率^[23](图 3)。此外,联合卫星测高技术与其他类型多源遥感数据还可以有效估算湖

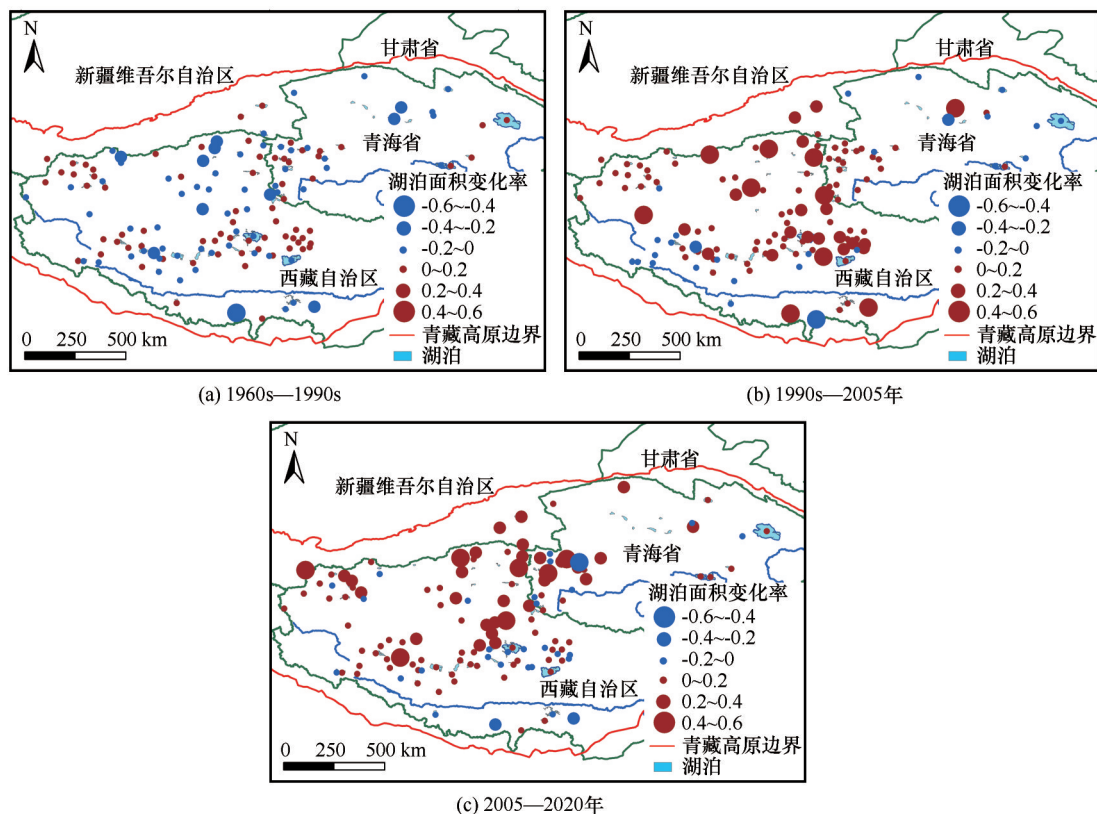


图2 1960—2020年青藏高原湖泊(>50 km²)面积变化趋势^[24-25]

Fig. 2 The changes in lake area (>50 km²) in Qinghai-Tibet Plateau during 1960—2020^[24-25]



图3 基于DAHITI数据的青藏高原典型湖泊的水位变化趋势^[26]

Fig. 3 The monthly trends in water elevations of typical lakes on the Qinghai-Tibet Plateau based on DAHITI data^[26]

泊水量变化(图4),如Zhan等^[27]在利用ICESat-2激光测高数据对其进行精度评估的基础上,采用SRTM DEM估算湖泊水量变化。

利用数据资源更为丰富的光学影像立体像对生成DEM来监测湖泊高程变化的方法已经被广泛应用。此外,以湖泊流域DEM为基础,湖泊水量变化能够通过面积与水位变化估算^[28]。

Zhang等^[29]利用2003—2009年ICESat测高数

据观测超过200个湖泊,结果表明青藏高原整体上体现出北部湖泊水位明显升高,而南部水位以下降为主的空间分布特征。其中面积较大的色林错水位上升显著,1979—2017年该湖的水位上升幅度达 $0.37 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[30],现已成为海拔超过4 000米最大的湖泊^[16]。Yang等^[28]联合SRTM-DEM和Landsat影像建立了青藏高原>50 m²的湖泊面积与水量变化关系,并根据对114个湖泊估算结果表明,1976年以来湖泊水量呈现不同程度的增加。Luo等^[31]联合ICESat-1/2监测了242个>1 km²的湖泊,结果显示2003—2019年间,总水量变化率为 $(11.51 \pm 2.26) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Li等^[32]监测了青藏高原52个大型湖泊的水量变化,发现大部分湖泊呈现扩张趋势,2000—2017年水量总共增加了 $(100.1 \pm 5.7) \text{ km}^3$ 。

1.3 基于多源遥感数据的青藏高原湖泊水温和湖冰变化

湖泊水温是影响湖泊初级生产力的重要因素,也是气候变化的敏感指标,水温可以根据MODIS或NOAA/AVHRR的光学图像的热红外波段进行反演或微波传感器直接监测^[3](表2)。其中搭载在Terra和Aqua两颗太阳同步卫星上的MODIS传感

表2 基于不同遥感数据的青藏高原湖泊变化监测^[3]

Table 2 The monitoring in lake changes in the Qinghai-Tibet Plateau using different remote sensing data ^[3]		
适用领域	数据来源	相关参考文献或来源
湖泊面积变化	多时相遥感影像、微波雷达影像	Song et al, 2014 ^[3] 、Zhang et al, 2019 ^[10,33] 、李均力等, 2011 ^[17] 、马荣华等,2011 ^[1] 、朱立平等, 2010 ^[34] 、朱立平等, 2020 ^[24]
湖泊水位变化	卫星测高数据、立体相对	Li et al, 2019 ^[32] 、Luo et al, 2021 ^[31] 、Jiang et al 2020 ^[35] 、Xu et al, 2021 ^[36] 、Zhao et al, 2017 ^[37] 、Zhang et al, 2011 ^[19]
湖泊水量变化	多时相光学影像、湖泊流域DEM、 立体相对	Chen et al, 2020 ^[38] 、Luo et al, 2020 ^[39] 、Yang et al, 2017 ^[28]
湖冰变化	亮温数据,积雪覆盖产品(MODIS)	Cai et al, 2019 ^[40] 、Kropáček et al, 2013 ^[41] 、Zhu et al, 2020 ^[5]
湖泊理化参数变化	多时相光学影像、微波雷达影像	Fukushima et al, 2016 ^[42] 、Huang et al,2017 ^[43] 、Wang et al, 2010 ^[44]

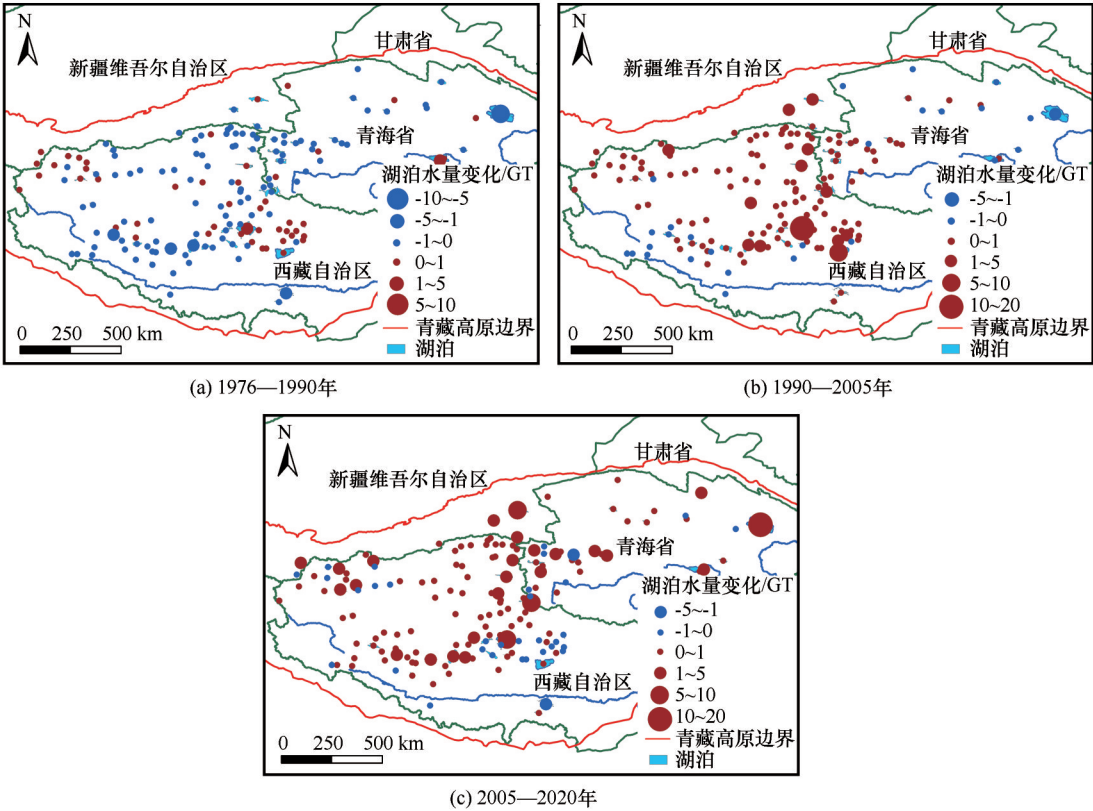


图4 1976—2019年青藏高原湖泊(>50 km²)水量变化趋势^[45]

Fig. 4 The changes in the lake water volume (>50 km²) in Qinghai-Tibet Plateau during 1976—2019^[45]

器,具有较高的时间分辨率(一天两次经过赤道),这为实时监测整个青藏高原湖泊水面温度变化提供了有效的数据资源^[46]。勾鹏等^[47]就利用MODIS数据对纳木错表层湖水温度变化率的观测和模拟,他发现纳木错水温的季节性差异很大,夏季水温相对偏低,春、秋季节水温相对偏高。Huang等^[43]进一步发现纳木错湖水在1979—2012年间的夏季表层水温逐年波动升温,年平均升高(0.052±0.025)℃。

在湖水温度普遍升高的背景下,湖冰作为大气和湖泊间能量交换的结果,对气候变化的指示器以及放大器作用更加明显,冰物候能够真实反映高原

地区气候在不同时段的变化信息及其变化趋势。气温是湖冰最直接的影响因素,冬季均温越低,湖冰覆盖范围越大,湖冰越厚,完全封冻天数越长。较大风速可以加速湖泊传输水汽和局地对流,导致湖面降温明显,加速湖冰冻结、冰厚增加,冻结期延长。从湖冰变化时间变化特征来看,湖冰变化与最低水温、湖面最低辐射亮温值的变化趋势一致^[40]。根据遥感图像中湖水的光谱特征,湖水与湖冰在各波段的反射率呈现较大差异,因此利用湖面辐射亮温突变可以判别湖泊冻融日期^[40],如采用AVHRR等亮温数据来监测湖泊亮温的长期变化信息,可以

估算青藏高原湖泊冻结与消融日期的长期变化趋势^[48]。高时间分辨率的光学遥感也可以有效监测湖冰变化,如陈贤章等^[49]通过 AVHRR 数据的 1、2 和 4 波段,监测 1993 至 1994 年青海湖的湖水冻结情况,殷青军等^[50]利用 MODIS 的 1、2 波段来识别湖冰变化。目前,MODIS 积雪产品成为研究青藏高原湖冰变化使用最广泛的光学遥感数据产品。受限于光学遥感的技术限制,大多数湖冰研究主要集中于湖冰范围识别,对湖冰厚度的研究却相对较少^[51]。而不易受到云雪天气影响的微波遥感数据除了监测湖冰范围还能估算湖冰厚度,如欧洲遥感卫星 (ERS)、Radarsat、Sentinel-2 等提供的合成 SAR 影像可准确地估算湖冰形成/融化过程及湖冰厚度^[52]。主动微波技术的时间分辨率较低,限制了对湖冰进行每日监测的能力,湖冰变化快、对时间分辨率要求高的特点适合被动微波辐射计数据^[52]。

在湖冰监测结果方面,近 20 年来,随着湖泊面积扩张,悬浮物浓度下降和透明度上升,湖冰冻结日期延后,冰期普遍缩短,如勾鹏等^[47]发现 2000 年后纳木错青藏高原湖冰冬季冻结日期延后和春季消融日期提前导致冰期缩短,且消融期提前幅度较大。Kropáček 等^[41]利用 MODIS 8 天合成数据分析了 2001—2010 年青藏高原 59 个大型湖泊的冰物候变化,结果显示大部分湖泊均出现冰期缩短的现象;Cai 等^[40]利用 MODIS 每日积雪产品发现青藏高原 58 个湖泊的平均冰期为 157.78 天,其中 18 个湖泊的平均冰期延长速率为 $1.11 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,另外 40 个湖泊的平均冰期缩短速率为 $0.80 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ 。令人意外的是,部分研究发现青藏高原南部湖泊春季湖冰的融化日期出现推迟的现象^[53],这是由于南极涛动等全球气候异常使得青藏高原上空生成一个异常气旋,这有利于该区域春季降雪的形成,进而降低地面气温,从而导致湖面结冰持续时间的延长^[54]。

1.4 基于多源遥感数据的青藏高原湖泊盐度和透明度变化

卫星遥感为大尺度多时段湖泊水体参数的反演提供了有力手段^[16],该技术不仅能够被用来获取湖泊水位、面积、水温等物理信息,还可以被广泛地用来监测盐度、透明度、水生植物等水体参数指标^[3,55]。利用遥感技术监测湖泊水质环境已经逐渐从定性描述发展到定量反演,如 Lee 等^[56]利用青藏高原大部分湖泊的叶绿素、有机质、和悬浮物浓度很低的特征,基于水色-透明度反演模型分析

2000—2017 年 152 个湖泊透明度变化,其中 91 个湖泊呈透明度上升趋势,而另 61 个呈透明度下降现象。此外,利用 MODIS 遥感影像特别是其中的 B4 绿色波段的湖泊反射率来反演湖泊透明度效果较好^[57]。利用光学遥感提取青藏高原湖泊不同水域的光谱特征,并根据水质参数和水色的相互关系,还可研究水质的变化^[58]。如刘翀等^[57]使用 MODIS 数据测量湖泊透明度时间变化特征,并以塞氏盘实测数据作为验证,结果表明降水/融水季节的湖泊透明度与湖泊所在流域的降水变化呈正相关。Song 等^[59]也利用水面光谱信号与实地测量的塞氏盘深度计监测了全国湖泊的透明度,结果发现青藏高原湖泊拥有最高的透明度 (2.94 m) (图 5)。

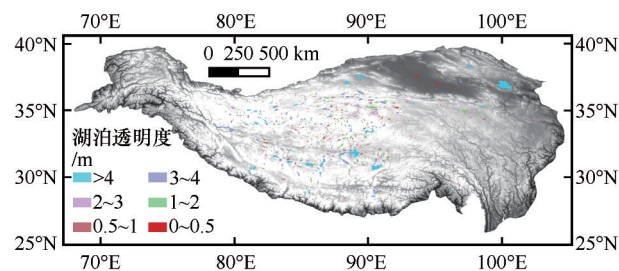


图 5 青藏高原湖泊透明度分布图^[59]

Fig. 5 Distribution map of lake transparency in Qinghai-Tibet Plateau^[59]

过去几十年,伴随着湖泊扩张的是淡水补给量增大,进而导致湖泊盐度和矿化度下降。如 Zhu 等^[60]发现色林错地区大部分湖泊在 1976—2017 年间出现盐度和矿化度普遍下降现象,特别是矿化度从 1979 年的 $18.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 2017 年的 $12.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[61]。水温、盐度等水体参数变化对湖泊的水生生物也产生了深远的影响,如 Lin 等^[62]发现水温和盐度的变化对青藏高原湖泊食物链各营养级的相互作用机制中,盐度在 3~5 或 25~28 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 区间时,湖泊浮游动物种群对盐度变化最为敏感。水温随季节变化的同时,与此密切相关的是生态及生物多样性的变化,湖水温度和盐度变化会影响湖中生态系统多样性以及食物链的长度^[5]。

2 青藏高原湖泊水量平衡定量估算及气候驱动因素分析

2.1 青藏高原湖泊水量平衡定量研究

部分学者针对某单一湖泊,以流域为尺度应用多源遥感与水文模型进行了定量研究,力图得出每个气候因素对湖泊变化具体的贡献程度^[63]。如朱

立平等^[34]率先定量化评估出不同气候要素对纳木错湖泊扩张的贡献程度,结果表明尽管降水是纳木错最主要的湖泊补给来源(~60%),而冰川融水只占总补给量的~10%,但是冰川融水对湖泊近期的扩张却起着主导作用(表3)。Lei等^[64]模拟出纳木错、色林错和蓬错等以冰川融水补给为主的湖泊的水位上升中冰川融水贡献程度达到了11.4%~28.7%。Tong等^[65]联合地表水文模型与冰川融化模型计算出降水对色林错湖泊水量变化贡献程度为67%~75%,而冰川融化的贡献程度却小于10%。Zhou等^[66]采用 Water and Energy Budget-based Distribut-

ed Hydrological Model (WEB-DHM)模型和两种蒸发算法测算出流域径流输入、湖面降水量和蒸发量对湖泊水量平衡的贡献程度分别为49.5%、22.1%和18.3%。当前,随着遥感技术的发展,越来越多的更大尺度的湖泊水量平衡定量化研究取得进展,如Zhang等^[67]估算出青藏高原内陆地区的湖泊水量增加的主要贡献因素是降水增加(74%),而冰川融化、冻土消融和其他因素分别贡献了13%、12%和1%。Zhang等^[68]还进一步监测了1976—2019年1 132个面积大于1 km²的湖泊的水量变化,并评估了冰川补给对流域范围内湖泊水量变化的贡献程度。

表3 纳木错和色林错的水量平衡定量估算各要素变化情况^[30,44]
Table 3 Characteristics of quantitative estimation on water balance of Nam Co and Selin Co^[30,44]

湖泊名称	时期	指标	年均补给量(A)			总消耗与水量变化(B+C)	
			湖面降水	冰川径流	非冰川径流	湖面蒸发	年均水量变化
纳木错	1971—1991年	年均值/(亿m ³ ·a ⁻¹)	8.07	2.54	19.09	28.10	1.60
		占总补给比例/%	27.20	8.60	64.20	94.60	5.40
	1992—2004年	年均值/(亿m ³ ·a ⁻¹)	8.47	3.65	19.68	28.19	3.61
		占总补给比例/%	26.60	11.50	61.90	88.70	11.30
	1971—1991年与1992—2004年比较	年均值/(亿m ³ ·a ⁻¹)	0.40	1.10	0.56	0.09	2.01
		占总补给比例/%	19.10	52.80	28.10	4.30	95.70
色林错	1979—1999年	年均值/(亿m ³ ·a ⁻¹)	5.00	1.50	13.70	19.10	1.20
		占总补给比例/%	24.60	7.40	68.00	94.30	5.70
	2000—2013年	年均值/(亿m ³ ·a ⁻¹)	7.60	2.80	30.70	22.40	18.80
		占总补给比例/%	18.50	6.80	74.70	54.40	45.60
	1979—1999年与2000—2013年比较	年均值/(亿m ³ ·a ⁻¹)	6.00	2.00	20.50	20.40	8.20
		占总补给比例/%	21.10	7.10	71.80	71.30	28.70

青藏高原气象站点大多集中在高原东南部海拔较低的山谷地带,降水在不同海拔梯度存在较大差异,而且高山地区卫星降水数据仍有较大误差^[69]。在冰冻圈监测方面,有连续的物质平衡观测的冰川青藏高原只有15条^[6],冻土监测更为稀少。以上数据的缺失导致基于模型的湖泊定量研究缺少必要的计算参数,最终使得青藏高原只有部分典型湖泊的水量平衡被进行详细地定量研究,这对于青藏高原庞大的湖泊数量来说十分有限。

2.2 青藏高原湖泊水量平衡的气候驱动因素

以地表径流补给为主的湖泊主要受降水影响,以冰冻圈融水补给为主的湖泊则受气温影响较大^[70]。就具体的地域分布特征而言:气候干旱的藏北地区内陆湖泊受到羌塘高原稳定的冰川补给,但1990年代中期以来,由于大西洋多年代际振荡使得西风减弱进而导致水汽滞留青藏高原上空,还导致

更多的来自阿拉伯海的水汽进入青藏高原^[71]。以上大尺度气候原因导致青藏高原特别是西风带影响区域明显的暖湿化成了湖泊扩张的主要原因^[72];高原西部尤其是阿里地区的湖泊在过去40年扩张趋势明显,湖泊水量受到冰川融水和降水共同影响,特别是在降水稀少的年份,该区域内的冰川融水仍能有效维持湖泊水量平衡^[73]。藏东地区的湖泊总体上也体现出扩张特征,但其扩张程度不及北部和西部地区湖泊。较为特殊的是:藏南地区的湖泊水量总体上体现出持续减少的现象,如羊卓雍错近些年来仍出现面积减少、水位下降的现象^[74-75]。

降水是影响青藏高原湖泊水量平衡的最主要因素,Lei等^[76]发现1970年代以来喜马拉雅山地区降水的减少对应了湖泊的萎缩,1990年代以来青藏高原中部和北部地区的降水累积量的增加对应了湖泊的扩张。Jiang等^[35]通过对比降水量与湖泊水

量变化来推测降水是湖泊变化的主要驱动因素。通过降水量还能预测青藏高原湖泊未来的演变趋势,如 Yang 等^[77]用水量平衡模型由湖泊水量变化来反演出该时段降水量的变化,然后利用气候模型中预测的降水量变化趋势来推测未来 20 年青藏高原湖泊的扩张程度。

蒸发量是湖泊水量平衡的另一重要影响因子,风速和太阳辐射的减小使得青藏高原多数地区潜在蒸发的减弱^[78],这一定程度上影响了过去几十年大多数湖泊的扩张。湖泊水量变化同时受到降水和蒸发的共同影响,大量的研究都表明,1970 年至 80 年代青藏高原湖泊的剧烈萎缩与该时段的低降水量与高蒸发量有直接的关系^[79-80]。Lei 等^[76]测算出降水增加和蒸发减少对青藏高原中部湖泊的水量增加起着~70% 的贡献程度。

日益加速的冰川消融和冻土退化通常被认为是促进湖泊扩张和抑制湖泊收缩的重要因素^[81],如 Lei 等^[82]通过对令戈错流域冰川储量与湖泊水量的估算发现冰川融水是湖泊扩张的主要原因, Li 等^[83]推测冻土退化可能是青藏高原湖泊变化的重要驱动因素。Song 等^[84]通过分别比较冰川补给类型湖泊与非冰川补给类型湖泊与降水变化的相关程度,发现该区域的湖泊扩张中冰川消融与降水/蒸发扮演了相同重要的作用。与之相反, Brun 等^[85]发现藏高原内流区冰川质量损失对湖泊体积增加的贡献却十分有限($19\% \pm 21\%$)。Ke 等^[86]也证实了 Brun 等的观点,他进一步发现冰川消融产生的水量 $[(0.44 \pm 0.80) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}]$ 在青藏高原内流区湖泊大规模的水量增加 $[(9.44 \pm 1.43) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}]$ 中所占的比重非常小。Zhang 等^[67]直接估算出青藏高原内陆地区由于冻土退化贡献了该区域湖泊水量增加的 12%。

参照 Yang 等^[28]的分类依据,青藏高原湖泊变化的气候驱动类型可分为:A 型:西风控制区的羌塘高原中、北部和阿里地区的湖泊变化受降水增加和冰川融水的影响,具有由平稳向强烈扩张的趋势;B 型:印度季风影响下藏南湖泊,近期印度季风降水量的减少,水量变化呈现波动下降趋势;C 型:青藏高原东南部湖泊变化主要受降水影响,先平稳后快速增加;D 型:西风主导的青藏高原中北部和东北部,2000 年前后降水增加明显的区域,过去几十年出现先减后增的现象(图 6)。

综上,关于青藏高原湖泊变化的气候响应机制研究大多停留在对降水、蒸发、温度、风速、冰冻圈

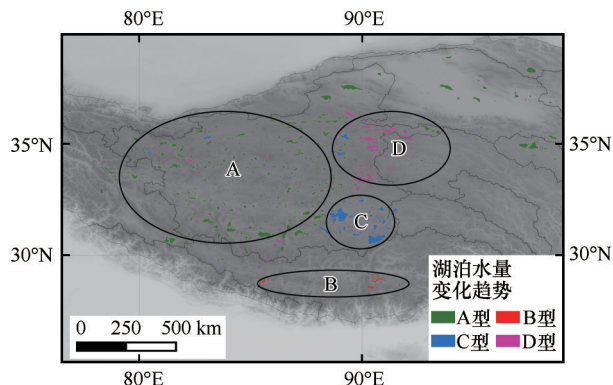


图 6 不同气候驱动因素主导下的青藏高原湖泊分类^[28]

Fig. 6 The classification of lakes on the Qinghai-Tibet Plateau under different climatic driving factors^[28]

融化等气候因素的定性描述上。但随着遥感技术的发展,在湖泊水量平衡方面,越来越多的研究开始在定量化方面取得进展^[9]。

3 结论与展望

3.1 结论

(1) 遥感技术在缺乏传统实测水文数据的青藏高原湖泊监测方面具有广阔应用前景,湖泊范围、水位、冰物候、水体参数等反映区域气候变化的重要指标都是可以通过遥感技术比较容易地获取。当前,学术界在青藏高原湖泊水量估算、湖泊-气候量化影响、水体参数反演、湖冰监测及补给冰冻圈物质平衡等方面取得大量的进展。

(2) 过去几十年,暖湿化环境下的降水增多和冰川冻土消融导致青藏高原绝大部分地区湖泊持续扩张,而且湖泊水位变化的空间分布特征和西风带及印度季风带影响区的降水量变化具有高度的空间一致性。

(3) 大尺度的降水年代际变化是青藏高原湖泊近期变化的主要原因,而冰川冻土加速消融又进一步加速湖泊扩张或抑制了部分湖泊收缩。随着遥感技术的发展,青藏高原在更多、更大尺度的湖泊水量平衡定量估算方面取得越来越多的进展。

3.2 展望

青藏高原湖泊不仅对区域气候变化响应敏感,还通过大气环流对更大尺度的气候格局产生影响,在夏季甚至能影响周边地区的降水^[87]。尽管遥感及其反演技术能够较容易地获取湖泊面积和水位等信息,但由于湖盆形状、湖泊深度、岸线地形差异,使得青藏高原湖泊到底存储了多少水量一直较难估算^[5]。掌握气候变化对湖泊储水条件及储水量

的影响机理,对深入了解“亚洲水塔”的水循环作用至关重要。此外,全面掌握湖泊理化性质能更好地理解湖泊对气候变化的响应,这就要求基于遥感影像光谱数据和湖泊水色反演湖泊盐度、透明度及其他理化性质在算法和精度上进行更多地改进。

大西洋年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)和南极涛动(Antarctic Oscillation, AAO)等气候事件通过西风和印度季风影响着青藏高原的大气环流和降水变化。与此同时,全球气候变暖导致的冰川冻土退化也深刻地影响着高原的湖泊形状和理化性质变化。在此背景下,更多流域的湖泊水量平衡的主导机制如何?水量平衡的不同影响要素在大尺度气候变化及大气环流波动下如何发展作用?回答以上科学问题需要基于遥感技术在更大范围、更多的流域尺度开展径流(包括融水、降水及地下水)、降水、蒸发、风速等多因素联合观测与建模。此外,对湖泊水量变化的深入理解,还必须开展遥感和气候变化相结合的学科交叉研究。即使在遥感技术获得前所未有发展的今天,关于青藏高原湖泊监测的某些关键技术难点仍然难以克服,如:湖泊水深测量、巨大海拔高差导致的气象数据失真、流域径流记录等。将来,随着更多遥感数据的开放共享,以及更多水文与气象站点的投入使用,为青藏高原湖泊的水量平衡定量研究提供更好的数据条件。

参考文献(References):

- [1] Ma Ronghua, Yang Guishan, Duan Hongtao, et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution[J]. Science China (Terrae), 2011, 41(3): 394-401. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 394-401.]
- [2] Pritchard H D. Asia's glaciers are a regionally important buffer against drought[J]. Nature, 2017, 545(7653): 169-174.
- [3] Song Chunqiao, Huang Bo, Ke Linghong, et al. Remote sensing of alpine lake water environment changes on the Tibetan Plateau and surroundings: a review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92: 26-37.
- [4] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. Nature, 2016, 540(7633): 418-422.
- [5] Zhu Liping, Peng Ping, Zhang Guoqing, 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. [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.]
- [6] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature climate change, 2012, 2(9): 663-667.
- [7] Sun He, Su Fengge, Huang Jingheng, et al. Contrasting precipitation gradient characteristics between westerlies and monsoon dominated upstream river basins in the Third Pole[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(1): 91-104. [孙赫, 苏凤阁, 黄敬恒, 等. 第三极西风 and 季风主导流域源区降水呈现不同梯度特征[J]. 科学通报, 2020, 65(1): 91-104.]
- [8] Zhu Liping, Zhang Guoqing, Yang Ruimin, et al. Lake variations on Tibetan Plateau of recent 40 years and future changing tendency[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1254-1263. [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[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1254-1263.]
- [9] Zhang Guoqing. 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. [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.]
- [10] Zhang Guoqing, Luo Wei, Chen Wenfeng, et al. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 2019, 64(18): 1306-1309.
- [11] Ji L, Zhang L, Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2009, 75(11): 1307-1317.
- [12] McFeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International journal of remote sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [13] Jiang Liguang, Yao Zhijun, Liu Zhaoifei, et al. A review of lake dynamic change research based on remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Applicate, 2013, 28(5): 807-814. [姜丽光, 姚治君, 刘兆飞, 等. 湖泊动态变化遥感研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 807-814.]
- [14] Song Chunqiao, Zhang Pengfei, Ma Ronghua. Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1406-1420. [宋春桥, 詹鹏飞, 马荣华. 湖泊水情遥感研究进展[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1406-1420.]
- [15] Wang Sumin, Dou Hongshen. Records of Chinese lakes[M]. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [16] Zhu Liping, Ju Jianting, Qiao Baojin, 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. [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.]
- [17] Li Junli, Sheng Yongwei, Luo Chengjian, et al. Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(3): 311-320. [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.]
- [18] Zhang Guoqing, Yao Tandong, Xie Hongjie, et al. Lakes' state and abundance across the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(24): 3010-3021.
- [19] Zhang Guoqing, Xie Hongjie, Kang Shichang, 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.
- [20] Field C B, Barros V R. Climate change 2014-Impacts, adaptation and vulnerability: regional aspects[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [21] Song Chunqiao, Ye Qinghua, Cheng Xiao. Shifts in water-level

- el variation of Namco in the central Tibetan Plateau from ICESat and CryoSat-2 altimetry and station observations [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(14): 1287-1297.
- [22] Song Chunqiao, Ye Qinghua, Sheng Yongwei, et al. Combined ICESat and CryoSat-2 Altimetry for Accessing Water Level Dynamics of Tibetan Lakes over 2003—2014 [J]. *Water*, 2015, 7(9): 4685-4700.
- [23] Zhao Yun. Method of monitoring water level change of main lakes in china with radar altimeter data [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. [赵云. 雷达高度计数据中国主要湖泊水位变化监测方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.]
- [24] Zhu Liping, Peng Ping. Data of annual lake area in the endorheic basin of the Qinghai-Tibet Plateau from 1986 to 2019 [DS]. National Tibetan Plateau Data Center, 2020. 10. 11888/Hydro. tpd. 270748. [朱立平, 彭萍. 青藏高原内陆流域年际湖泊面积数据产品 (1986—2019) (V1.0) [DS]. 国家青藏高原科学数据中心, 2020. DOI: 2020. 10. 11888/Hydro. tpd. 270748.]
- [25] Zhu Liping, Peng Ping. Data set of recent lake area and water volume changes in the Qinghai-Tibet Plateau (1976—2013) [DS]. National Tibetan Plateau Data Center, 2020. 2020. 10. 11888/Hydro. tpd. 270397. [朱立平, 彭萍. 青藏高原近前期湖泊面积和水量变化数据集 (1976—2013) [DS]. 国家青藏高原科学数据中心, 2020. DOI: 2020. 10. 11888/Hydro. tpd. 270397.]
- [26] Schwatke C, Dettmering D, Bosch W, et al. DAHITI-an innovative approach for estimating water level time series over inland water using multi-mission satellite altimetry [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(10): 4345-4364.
- [27] Zhan Pengfei, Song Chunqiao, Luo Shuangxiao, et al. Lake level reconstructed from DEM-based virtual station: comparison of multisource DEMs with laser altimetry and UAV-LiDAR measurements [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 19: 1-5.
- [28] Yang Ruimin, Zhu liping, Wang Junbao, et al. Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013 [J]. *Climatic Change*, 2017, 140(3): 621-633.
- [29] Zhang Guoqing, Yao Tandong, Xie Hongjie, et al. Increased mass over the Tibetan Plateau: from lakes or glaciers? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(10): 2125-2130.
- [30] Guo Yanhong, Zhang Yinsheng, Ma Ning, 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.
- [31] Luo Shuangxiao, Song Chunqiao, Zhan Pengfei, et al. Refined estimation of lake water level and storage changes on the Tibetan Plateau from ICESat/ICESat-2 [J]. *Catena*, 2021, 200: 105177.
- [32] Li Xingdong, Long Di, Huang Qi, et al. 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 [J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1603-1627.
- [33] Zhang Guoqing, Yao Tandong, Chen Wenfeng, et al. Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 386-404.
- [34] Zhu Liping, Xie Manping, Wu Yanhong. 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(18): 1789-1798. [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.]
- [35] Jiang L, Nielsen K, Andersen O B, et al. A bigger picture of how the Tibetan lakes have changed over the past decade revealed by CryoSat-2 altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(23): e2020JD033161.
- [36] Xu Fenglin, Zhang Guoqing, Yi Shuang, et al. Seasonal trends and cycles of lake-level variations over the Tibetan Plateau using multi-sensor altimetry data [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127251.
- [37] Zhao Yun, Liao Jingjuan, Shen Guozhuang, et al. Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 633-644.
- [38] Chen Tan, Song Chunqiao, Ke Linghong, et al. Estimating seasonal water budgets in global lakes by using multi-source remote sensing measurements [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125781.
- [39] Luo Rong, Yuan Qiangqiang, Yue Linwei, et al. Monitoring recent lake variations under climate change around the Altai Mountains using multimission satellite data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 14: 1374-1388.
- [40] Cai Yu, Ke Changqing, Li Xinggong, et al. Variations of lake ice phenology on the Tibetan Plateau from 2001 to 2017 based on MODIS data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(2): 825-843.
- [41] Kropáček J, Maussion F, Chen F, et al. Analysis of ice phenology of lakes on the Tibetan Plateau from MODIS data [J]. *The Cryosphere*, 2013, 7(1): 287-301.
- [42] Fukushima T, Matsushita B, Oyama Y, et al. Semi-analytical prediction of Secchi depth using remote-sensing reflectance for lakes with a wide range of turbidity [J]. *Hydrobiologia*, 2016, 780(1): 5-20.
- [43] Huang Lei, Wang Junbo, Zhu Liping, et al. The warming of large lakes on the Tibetan Plateau: evidence from a lake model simulation of Nam Co, China, during 1979—2012 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(24): 13095-13107.
- [44] Wang Hailei, Wang Yunsheng. Preliminary analysis on Mg^{2+} 、 Ca^{2+} and Mg/Ca as salinity indicators of lakes in the Qinghai Tibetan Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 894-900. [王海雷, 王云生. 青藏高原湖泊 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Mg/Ca 盐度指示意义的初步分析 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(6): 894-900.]
- [45] Zhang Guoqing. China lake dataset (1960s—2020) [DS]. National Tibetan Plateau Data Center, 2019. DOI: 2019. 10. 11888/Hydro. tpd. 270302. [张国庆. 中国湖泊数据集 (1960s—2020) [DS]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019. DOI: 2019. 10. 11888/Hydro. tpd. 270302.]
- [46] Reinart A, Reinhold M. Mapping surface temperature in large lakes with MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(2): 603-611.
- [47] Gou Peng, Ye Qinghua, Wei Qiufang. Lake ice change at the Nam Co Lake on the Tibetan Plateau during 2000—2013 and influencing factors [J]. *Progress in Geography*, 34(10): 1241-1249. [勾鹏, 叶庆华, 魏秋方. 2000—2013 年西藏纳木错湖冰变化及其影响因素 [J]. 地理科学进展, 2015, 34(10): 1241-1249.]
- [48] Ke Changqing, Tao Anqi, Jin Xin, et al. Variability in the ice

- phenology of Nam Co Lake in central Tibet from scanning multichannel microwave radiometer and special sensor microwave/imager: 1978 to 2013[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073477.
- [49] Chen Xianzhang, Wang Guangyu, Li Wenjun, et al. Lake ice and its remote sensing monitoring in the Tibetsn Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(3): 241-246. [陈贤章, 王光宇, 李文君, 等. 青藏高原湖冰及其遥感监测[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(3): 241-246.]
- [50] Yin Qingjun, Yang Yinglian. Remote sensing monitoring of lake Qinghai based on EOS/MODIS data [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, (4): 356-360. [殷青军, 杨英莲. 基于EOS/MODIS数据的青海湖遥感监测[J]. *湖泊科学*, 2005, (4): 356-360.]
- [51] Qiu Yubao, Wang Xingxing, Ruan Yongjian, et al. Passive microwave remote sensing of lake freeze-thawing over Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(5): 1438-1449. [邱玉宝, 王星星, 阮永俭, 等. 基于星载被动微波遥感的青藏高原湖冰物候监测方法[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(5): 1438-1449.]
- [52] Scott K A, Xu Linlin, Homa K P. Retrieval of ice/water observations from synthetic aperture radar imagery for use in lake ice data assimilation [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2020, 46(6): 1521-1532.
- [53] Yue Siyu, Wang Bin, Yang Kun, et al. Mechanisms of the decadal variability of monsoon rainfall in the southern Tibetan Plateau [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 16(1): 014011.
- [54] Liu Yong, Chen Huopo, Li Huixin, et al. The impact of preceding spring Antarctic Oscillation on the variations of lake ice phenology over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(2): 639-656.
- [55] Tian Shufang, Qin Xuwen, Zhang Mianping, et al. Quantitative analysis of remote sensing on the total salinity of Zhabuye Salt Lake in Tibet [J]. *Geoscience*, 2005, 19(4): 596.
- [56] Lee Zhongping, Shang Shaoling, Hu Chuanmin, et al. Secchi disk depth: a new theory and mechanistic model for underwater visibility [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 139-149.
- [57] Liu Chong, Zhu Liping, Wang Junbo, et al. Remote sensing-based estimation of lake water clarity on the Tibetan Plateau [J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(5): 597-609. [刘翀, 朱立平, 王君波, 等. 基于MODIS的青藏高原湖泊透明度遥感反演[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(5): 597-609.]
- [58] Zhu Lingya. Remote sensing monitoring and assessment of water quality for lakes [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2006. [祝令亚. 湖泊水质遥感监测与评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.]
- [59] Song Kaishan, Liu Ge, Wang Qiang, et al. Quantification of lake clarity in China using Landsat OLI imagery data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 243: 111800.
- [60] Second Tibetan Plateau Expedition Survey Team. Integrated scientific survey report for environment changes in the Serling Co area of the Tibetan Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2020: 105-106. [第二次青藏高原综合科学考察研究队. 西藏色林错地区环境变化综合科学考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 105-106.]
- [61] Zhu Liping, Wang Junbo, Ju Jianting, et al. Climatic and lake environmental changes in the Serling Co region of Tibet over a variety of timescales [J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(7): 422-424.
- [62] Lin Qiuqi, Xu Lei, Hou Juzhi, et al. Responses of trophic structure and zooplankton community to salinity and temperature in Tibetan lakes: implication for the effect of climate warming [J]. *Water Research*, 2017, 124: 618-629.
- [63] Wang Lei, Koike Toshio, Yang Kun, et al. Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D8).
- [64] Lei Yanbin, Yao Tandong, Bird B W, et al. Coherent lake growth on the central Tibetan Plateau since the 1970s: characterization and attribution [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 483: 61-67.
- [65] Tong Kai, Su Fengge, Xu Baiqing. Quantifying the contribution of glacier meltwater in the expansion of the largest lake in Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(19): 11158-11173.
- [66] Zhou Jing, Wang Lei, Zhang Yinsheng, et al. Exploring the water storage changes in the largest lake (Selin Co) over the Tibetan Plateau during 2003—2012 from a basin-wide hydrological modeling [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(10): 8060-8086.
- [67] Zhang Guoqing, Yao Tandong, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5550-5560.
- [68] Zhang Guoqing, Bolch Tobias, Chen Wenfeng, et al. Comprehensive estimation of lake volume changes on the Tibetan Plateau during 1976—2019 and basin-wide glacier contribution [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: 145463.
- [69] Behrangi A, Gardner A S, Reager J T, et al. Using GRACE to constrain precipitation amount over cold mountainous basins [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 219-227.
- [70] Lü Li, Zhang Tingbin, Yi Guihua, 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): 573-89. [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[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 573-589.]
- [71] Sun Jing, Yang Kun, Guo Weidong, et al. Why has the inner Tibetan Plateau become wetter since the mid-1990s? [J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(19): 8507-8522.
- [72] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Li Long, et al. Spatial-temporal variations of lake area in Hoh Xil region in the past 40 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 886-896. [姚晓军, 刘时银, 李龙, 等. 近40年可可西里地区湖泊时空变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 886-896.]
- [73] Dong Siyang, Xue Xian, You Quangang, 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. [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.]
- [74] Song Chunqiao, Huang Bo, 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.
- [75] Chu Duo, Pu Qiong, Laba Zhuoma, et al. Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40 a [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(3): 494-502. [除多, 普穷, 拉巴卓玛, 等. 近40年西藏羊

- 卓雍错湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 494-502.]
- [76] Lei Yanbin, Yang Kun, Wang Bin, et al. Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change [J]. Climatic Change, 2014, 125(2): 281-290.
- [77] Yang Kun, Lu Hui, Yue Siyu, et al. Quantifying recent precipitation change and predicting lake expansion in the Inner Tibetan Plateau[J]. Climatic Change, 2018, 147(1): 149-163.
- [78] Yang Kun, Ye Baisheng, Zhou Degang, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau [J]. Climatic change, 2011, 109(3): 517-534.
- [79] Liao Jingjuan, Shen Guozhuang, Li Yingkui. Lake variations in response to climate change in the Tibetan Plateau in the past 40 years [J]. International Journal of Digital Earth, 2013, 6(6): 534-549.
- [80] Song Chunqiao, Huang Bo, Ke Linghong. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 135: 25-35.
- [81] Zhou Jing, Wang Lei, Zhong Xiaoyang, et al. Quantifying the major drivers for the expanding lakes in the interior Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 2022, 67(5): 474-478.
- [82] Lei Yanbin, Yao Tandong, Yi Chaolu, et al. Glacier mass loss induced the rapid growth of Linggo Co on the central Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology, 2012, 58(207): 177-184.
- [83] Li Yingkui, Liao Jingjuan, Guo Huadong, et al. Patterns and potential drivers of dramatic changes in Tibetan lakes, 1972—2010[J]. PloS one, 2014, 9(11): e111890.
- [84] Song Chunqiao, Sheng Yongwei. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis [J]. Climatic Change, 2016, 135(3): 493-507.
- [85] Brun F, Treichler D, Shean D, et al. Limited contribution of glacier mass loss to the recent increase in Tibetan Plateau lake volume[J]. Frontiers in Earth Science, 2020: 495.
- [86] Ke Linghong, Song Chunqiao, Wang Jida, et al. Constraining the contribution of glacier mass balance to the Tibetan lake growth in the early 21st century [J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 268: 112779.
- [87] Wu Yang, Huang Anning, Yang Ben, et al. Numerical study on the climatic effect of the lake clusters over Tibetan Plateau in summer[J]. Climate Dynamics, 2019, 53(9): 5215-5236.

A review on the research of remote sensing monitoring of lake changes and quantitative estimation of lake water balance in Qinghai-Tibet Plateau

CHEN Jun^{1,2}, LIU Yanzhao^{1,2}, CAO Ligu^{2,3}, HU Jianru^{1,2}, LIU Shuilin¹

(1. Department of Environmental and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230000, China; 2. Anhui Engineering and Technology Research Center for Smart City, Hefei 230000, China; 3. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Lakes over the Qinghai-Tibet Plateau are considered as the important indicators of regional climate variability. Since the mid-1990s, the expansion caused by the increasing precipitation due to the warming and humidifying environment and the accelerated melting of glacier and frozen soil has been the most prominent environmental change feature of Qinghai-Tibet Plateau. It is worth mentioning that the spatial distribution characteristics of lake water level changes are highly consistent with the precipitation changes in the affected areas of West-lies and Indian monsoon zone. The harsh natural environment makes it difficult to achieve the field observations of inland lakes on the Qinghai-Tibet Plateau. Currently, the development of remote sensing technologies can overcome the above-mentioned limitations, which has become the main research means of lake change monitoring on the Qinghai-Tibet Plateau. Based on the remote sensing monitoring technologies and methods, this paper summarized the research progress on the aspects of lake extent extraction, water volume change, water environment and ice phenology. Some studies have applied multi-source remote sensing and hydrological models to quantitatively evaluate water balance in the basin scale. The results have shown that the main contribution factor of lake water increase in inland areas of Qinghai-Tibet Plateau was the increase of precipitation, while the contribution of glacier melting, frozen soil melting and other factors was relatively small. Currently, academic circles generally believe that the annual variation of precipitation is the main reason for the recent changes of lakes in Qinghai-Tibet Plateau, and the accelerated melting of glacier and frozen soil further accelerates the expansion of lakes or inhibits the contraction of some lakes. The previous research on the climate response mechanism of lake changes in the Qinghai-Tibet Plateau was mostly limited to the qualitative description of climate factors, such as precipitation, evaporation, temperature, wind speed and glacier melting, etc. Now, in the aspect of lake water balance, more and more researches are making progress in quantification. In the future, with the open sharing of more remote sensing data as well as the building of more hydrological and meteorological stations, better data conditions will be provided for the quantitative research on water balance of lakes on the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: lake; remote sensing; Qinghai-Tibet Plateau; water balance; review

(责任编辑: 张国庆)