“亚洲水塔”的近期湖泊变化及气候响应: 进展、问题与展望

朱立平^{1,2,3*}, 鞠建廷¹, 乔宝晋^{1,4}, 杨瑞敏⁵, 刘翀^{1,3}, 韩博平⁶

1. 中国科学院青藏高原研究所, 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

3. 中国科学院大学学院, 北京 100049;

4. 郑州大学智慧城市研究院, 郑州 450001;

5. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000;

6. 暨南大学生态学系, 广州 510632

* 联系人, E-mail: lpzhu@itpcas.ac.cn

2019-06-13 收稿, 2019-07-18 修回, 2019-07-19 接受, 2019-08-07 网络版发表

第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0202)、中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20020102)、国家自然科学基金重点项目(41831177)和中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW038)资助

摘要 青藏高原分布的众多封闭湖泊是“亚洲水塔”的重要组成部分。最近几十年, 青藏高原的升温速率是全球平均升温速率的2倍, 并且呈现了明显的降水增长。作为中低纬度分布的最大冰冻圈系统, 青藏高原的气温和降水变化对湖泊变化产生了深刻的影响。湖泊水量和盐度变化是气候变化下湖泊水量平衡形成的结果, 是定量反映气候变化影响程度的重要指标, 而变化的时空特征可能反映了西风季风环流对地表水循环的影响。湖泊水体的物理化学参数是影响湖泊生态系统的重要因素, 其在气候变化下的改变深刻地影响着湖泊生态系统的组成与变化趋势。本文基于大量的青藏高原湖泊面积、水位、水量、水体物理化学参数与气候变化关系研究的分析, 梳理了青藏高原湖泊变化对气候变化响应的研究进展, 提出了第二次青藏高原综合科学考察研究任务中湖泊考察研究的主要目标和内容。

关键词 青藏高原, 亚洲水塔, 湖泊面积与水量, 湖水理化参数, 浮游生物, 西风季风环流

青藏高原分布着众多的冰川、湖泊, 是大江大河的发源地, 被称为“亚洲水塔”^[1]。青藏高原分布的众多封闭湖泊是“亚洲水塔”的重要组成部分, 其中面积大于1 km²的湖泊数量1171个, 总面积约46527 km², 占青藏高原面积的1.8%^[2]。青藏高原海拔较高, 分布着中低纬度最大的冰冻圈系统, 湖泊变化不仅与区域降水变化密切相关, 也受气候变暖引起的冰川融化、冻土退化的强烈影响。IPCC第五次评估报告的成果显示, 过去130多年全球平均气温升高了0.85°C, 主要升温时间

发生在1983~2012年的过去30年间^[3]。青藏高原是气候变化的敏感区域, 气候变幅更为显著。青藏高原地区98个气象站点观测数据表明, 1982~2012年平均气温升高幅度达到1.9°C^[4], 是全球平均升温幅度的2倍。除显著升温外, 青藏高原降水量也呈现增加趋势^[5]; 但风速呈减弱趋势^[6]; 潜在蒸发量有所下降^[7]。作为大气圈、冰冻圈和水圈的联系纽带, 青藏高原广泛分布的湖泊通过地表水的汇聚和蒸发成为地表水循环过程的重要环节, 并呈现出对气候变化的敏感响应。

引用格式: 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. 科学通报, 2019, 64: 2796–2806

Zhu L P, Ju J T, Qiao B J, et al. Recent lake changes of the Asia Water Tower and their climate response: Progress, problems and prospects (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2796–2806, doi: [10.1360/TB-2019-0185](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0185)

1 湖泊面积与水量变化及气候响应

1.1 湖泊面积与水位变化

湖泊面积与水位变化是湖泊对气候变化的最直观反映。进入21世纪以后,遥感数据的丰富和GIS技术的发展,使得研究者能够快速获取湖泊面积的长期变化。目前已经有大量研究分析了不同地区湖泊面积、水位变化及与气候变化的关系。鲁安新等人^[8]最早分析了冰川融化对湖泊扩张的影响。Wu和Zhu^[9]较早进行了纳木错不同时期的面积变化与气温和降水的关系研究。随着青藏高原的湖泊扩张愈加明显,近年来越来越多的高原湖泊面积及其变化的研究成果得以呈现^[10,11],这些成果既包括了对典型大湖的研究,如青海湖^[12]、纳木错^[13]、色林错^[14]和佩枯错^[15]等,又有对典型区域的研究,如那曲地区^[16]、羌塘地区^[17]、可可西里地区^[18]和三江源地区^[19]等,甚至整个青藏高原的研究^[20]。在利用遥感影像进行湖泊面积提取和比较时,也强调了需要注意影像的获取季节和空间分辨率的差异^[21]。

对青藏高原的典型湖泊面积研究发现,青海湖1991~2004年的萎缩与降水减少及气温升高引起的蒸发量增加有关^[22],2004~2009年的扩张更多受气温升高引起的冰川融水增加影响^[23],色林错1972~2013年不断扩张是降水增加和气温升高导致冰川融水增多的结果^[24]。其中,2003~2013年湖泊扩张趋势与夏季气温和蒸发最为相关^[25];玛旁雍错1970~2008年持续发生的萎缩主要受高原西南部降水减少以及气温升高导致的蒸发加强影响^[26]。

对青藏高原湖泊水位变化的最早分析来自于羊卓雍错的水位站长期记录^[27]。针对典型湖泊,一些研究者也通过布设压力式水位计研究湖泊水位的季节变化及其反映的水量变化与不同补给源的关系^[28~30]。近年来,由于具有一定时间跨度的卫星测高雷达数据的出现,使得对更多的湖泊水位变化分析成为可能,利用湖泊水位变化及其反映的水量波动研究也相继出现^[31~35]。研究发现,令戈错的水位在1974~2010年间升高了11.2 m,才多茶卡的水位在1992~2010年间升高了8.8 m,而且后期表现出加速升高的趋势。根据色林错的水量平衡估算,1979~2013年色林错湖泊水位累积上升了约14.0 m^[36]。

在过去的几十年,青藏高原湖泊面积和水位变化有着显著的空间差异。大量的研究已经根据湖泊面积的变化探讨了湖泊变化的原因,但未形成统一认识。例如,李均力等人^[37]认为湖泊面积的快速扩张主要是由

气温升高引起的冰川融水增多导致的;而Li等人^[38]则分析发现降水增加和气温导致的冻土融化为主要原因,气温引起的冰川融水次之。然而,温度和降水对湖泊发生影响的实质是湖泊补给发生变化,从而通过水量变化反映到湖泊面积上。由于湖盆形态的差异,湖泊面积和水位变化难以体现湖泊对气候变化的真实响应程度。如色林错的面积和水储量从1976年的1667 km²和309×10⁸ m³扩张到2017年的2389 km²和558×10⁸ m³,增加的幅度分别是43%和81%左右^[39]。最近的研究发现,羌塘高原北部和中部的湖泊面积在2000~2013年增幅相近,但前者水量增幅仅为后者一半^[40]。因此,应当注重湖泊水量变化研究,才能定量分析湖泊变化的主因和湖泊对气候变化的响应程度及其空间差异。

1.2 湖泊水量变化

20世纪80~90年代,随着全球变暖的出现,青藏高原的大部分湖泊出现了明显的退缩,而进入21世纪以来,尽管气候变暖依然加剧,但湖泊又由普遍退缩转为扩张^[10]。尽管我们知道增温引起的冰雪融水增加对湖泊扩张产生了一定影响,但是单纯从湖泊的面积变化难以准确判断气候变化的影响程度。气候变化影响湖泊变化的本质是通过补给与损耗的各个水量平衡要素来使湖泊发生变化。作为体现湖泊变化本质的关键指标,湖泊水量变化增强了不同时期及不同湖泊间变化的可对比性,使得人们能够定量分析湖泊变化对气候的响应程度及其空间差异。降水、气温、以及气温变化引起的冰雪融水、水面与陆面蒸发等共同构成影响水量平衡的气候要素^[41]。因此,研究湖泊水量变化以及与补给和损耗过程各要素变化之间的关系,才能准确反映气候变化影响程度及其时空差异。

湖泊水量变化研究主要有以下3种方式:第一种方式是实地测量某一湖泊面积条件下的湖泊水下地形,利用遥感影像获取的不同时期湖泊面积,构建湖泊面积-体积关系式,计算不同湖泊面积条件下的绝对水量及其变化。例如,Zhu等人^[41]利用纳木错的测深数据,获得了整个湖盆的水下地形,通过LANDSAT遥感影像中获取的不同时期的湖泊面积,估算了1971,1991和2004年的湖泊水量及3个年份间的变化量。杨瑞敏等人^[42]利用米堆冰湖测深数据估算了2001,2007,2009和2010年的冰湖水量及4个年份间的变化量。然而,由于青藏高原湖泊众多,大部分湖泊交通不便,缺乏实地测量数据,难以获得湖泊水下地形,对湖泊水量的研究多集中在其变

化量的分析上. 由于湖泊水位是一种相对容易获得的变化指标, 因此, 第二种方式是通过湖泊的水位变化计算其对应的水量变化. Lei等人^[43]利用野外实测的湖泊岸边一定范围内的湖深, 结合面积计算了色林错和纳木错等6个湖泊1970~2010年的水量变化量. 近年来, 卫星雷达测高技术不断发展并产出了一批青藏高原地区的湖泊高程数据, 一些研究者从雷达测高数据中提取出多个时刻的湖泊高程, 并从光学遥感影像上获取对应时刻的湖泊面积, 建立高程-面积之间的关系式, 再利用遥感数据提取的更长时期的湖泊面积, 获得较测高时段更长时间的湖泊高程序列, 从而估算长期的湖泊水量变化量. Song等人^[44]在利用ICESAT和LANDSAT数据获取了具有测高数据时期的青藏高原30多个湖泊水量变化量的基础上, 又进一步利用ICESAT/GLAS和ENVISAT RA-2以及MODIS影像获得了色林错1972~2011年的水量变化^[24]. 尽管卫星雷达测高数据是获取湖泊高程并进行水量变化计算的快速和有效方法, 但由于测高点的地面足迹(foot print)大小和距离间隔限制, 并非所有湖泊均可以被卫星雷达测高点覆盖, 由于波浪影响, 落在一些大型湖泊的地面足迹的对比结果也可能具有偏差. 因此, 第三种方法是通过湖泊的面积变化计算水量变化. 受湖盆地形影响, 某一湖泊面积与相应的水面高程(水位)对应, 并在不同形态的湖盆中具有不同的关系. 通过这种关系可以计算湖泊面积变化与水量变化之间的关系. Yang等人^[45]利用SRTM DEM(Shuttle Radar Topography Mission, Digital Elevation Model)和LANDSAT获取的湖泊面积, 建立了青藏高原面积大于50 km²的所有湖泊的面积与水量变化关系, 并通过不同大小的湖泊实地测深结果验证了方法的可靠性, 据此估算了114个封闭湖泊1976~1990, 1990~2000, 2000~2005及2005~2013年四期湖泊水量变化, 认为过去几十年青藏高原湖泊整体变化明显, 且具有显著的空间差异和时间变化特点. 由于青藏高原地区湖盆数字高程地形易于获取, 用于估算湖泊面积的遥感数据丰富, 时间和空间分辨率较高, 时序较长, 能够通过大数据计算获得每个湖盆的面积与水量变化关系, 从而获得大范围、长序列、高分辨率的湖泊水量变化序列.

2 湖泊水体参数与生态系统变化

2.1 湖泊物理化学参数变化

水温和盐度是湖泊对气候变化响应的重要物理化

学指标. 对纳木错水温与气温变化的研究发现, 最近30年夏季表层湖水水温平均升高率为 $0.52 \pm 0.25^\circ\text{C}/10\text{ a}$, 湖水温跃层的分层开始日期以 $(4.20 \pm 2.02)\text{ d}/10\text{ a}$ 的速率提前, 而分层的持续时间以 $(6.00 \pm 3.54)\text{ d}/10\text{ a}$ 的速率递增^[46]. 对色林错最近40年的盐度变化比较显示, 湖水矿化度已经从1979年的18.5 g/L下降到2017年的12.4 g/L^[39].

湖泊水体的化学特征受区域地质条件和气候条件如降水量等因素影响. 封闭水体的蒸发-沉淀过程是影响水化学特征的重要因素, 与区域内岩石风化作用和大气降水共同构成控制地表水化学组成的三大主要因素^[47]. 对于青藏高原地区的大多数封闭湖泊来讲, 湖泊的水化学成分主要来自流域的地表侵蚀^[48,49]. 进入湖泊的水化学离子在水中达到一定的溶解-沉淀平衡, 进而决定着湖泊的盐度^[50]. 气候变化在影响湖泊水量平衡的过程中, 降水、融水等淡水补给以及强烈蒸发等水量损耗, 均对进入湖水的水化学含量产生影响, 特别是一些特征离子总是趋于在新的水量平衡条件下达到新的溶解-沉淀平衡, 从而改变了湖水的盐度.

青藏高原湖泊多为内流封闭型, 少受人类活动干扰, 湖泊特征变化忠实而敏感地记录了该区气候与环境的变化过程^[51]. 在利用湖泊沉积进行古环境变化重建研究中, 通过湖水盐度的重建来分析气候与环境变化取得了很大的进展^[52~54]. 对青藏高原湖泊现代水化学参数的调查研究也在高原的不同湖泊得到了开展^[55~62], 并在不同程度上进行了与补给过程和气候变化之间的关系分析^[63,64,49]. 由于受降水量、冰雪融水和地表径流等因素影响, 湖泊水化学参数也表现出较为明显的季节动态变化特征^[65].

对于青藏高原众多而又地处交通不便位置的湖泊来讲, 很难全面连续监测湖泊的水化学特征, 特别是对大多数湖泊而言, 也缺乏过去的水化学数据资料. 然而, 湖泊水化学变化的最大特点是水中离子浓度发生变化, 其变化特征在湖泊的盐度上得以体现. 王海雷和郑绵平^[50]发现, 青藏高原湖泊的水化学成分中, Mg^{2+} 与湖水盐度具有一定的相关关系, 而在透明度较高的湖泊中, 特定离子在水中浓度的变化又能够通过水色体现. 在湖泊水体成分中, 影响湖泊水色的3个要素是: 浮游植物的叶绿素、无机的悬浮物和有机的黄色物质以及纯水本身. 青藏高原地区海拔较高、气候寒冷、环境恶劣, 加之绝大多数湖泊基本不受人类活动的影响, 湖泊生态系统生产力与内外源有机质输入不仅微弱, 而且变化幅度也较小. 实测数据表明该地区大部分湖泊

叶绿素 a 浓度仅为 $0.1\sim 5\text{ }\mu\text{g/L}$, 悬浮物浓度仅为 $0.1\sim 10\text{ mg/L}$ (未发表数据)。因此, 溶解性物质及其浓度变化可能是影响青藏高原湖泊水色的主要因素, 通过建立它们之间的相关关系, 能够尝试借助水色研究湖泊水体参数变化及其对环境的响应及其变化趋势。对青藏高原24个湖泊的研究表明, 湖泊水色与其透明度具有很好的相关性, 能够通过水色变化重建透明度的时空变化^[66], 而水色与盐度之间的相关性也接近60%(未发表数据), 具有利用水色重建湖泊盐度的基础。近年来, 遥感技术的发展为获取更多波段的湖泊水色提供了强大的数据基础, 运用不同的统计模型建立遥感影像水色参数与湖水盐度之间的反演关系, 并选择最优反演模型来研究湖泊盐度变化, 能够更好地揭示湖泊变化的时空特征及对气候变化的响应过程与程度。

2.2 湖泊浮游生物及其生境变化

根据2012~2015年夏季对青藏高原49个湖泊的调查结果, 以浮游植物种类组成的间隔距离为依据, 对青藏高原的湖泊进行聚类分析发现, 部分湖泊可以聚为四大类。第一类, 生物量较高的湖泊, 其特征为: 浮游生物丰度相对高($1.3\sim 4.2\text{ mg/L}$), 水体盐度较低($<5.5\text{ g/L}$), 水温相对较高($>17^{\circ}\text{C}$)。其优势种类以个体较大的硅藻为主。第二类, 生物量较低的高盐湖泊, 其特征为: 浮游生物生物量很低($0.06\sim 0.09\text{ mg/L}$), 盐度相对较高($20\sim 43\text{ g/L}$), 水温相对较高($>16^{\circ}\text{C}$)。其优势种类以小型硅藻为主。第三类和第四类都是生物量中等的湖泊, 它们的生物量在 $0.02\sim 0.43\text{ mg/L}$ 之间变化, 盐度变化范围 $0.22\sim 6\text{ g/L}$, 总体营养盐水平偏低而水温中等($13\sim 15^{\circ}\text{C}$)。第三类以匹克级浮游植物为主要优势种类, 第四类以鞭毛藻类为主要优势类群。鞭毛藻类能够在水体中垂直迁移, 有效地避免过度的紫外线伤害。此外, 很多鞭毛藻的兼性营养能力, 使它们能够获取更多的营养来源, 在贫营养的水体中更具优势。

因不同的浮游动物种类盐度耐受范围并不相同, 导致了不同盐度类型的湖泊浮游动物种类组成差别比较大。甲壳类动物分布在盐度 $0\sim 76\text{ g/L}$ 范围内, 其中, 枝角类分布在盐度范围为 $0\sim 27.5\text{ g/L}$ 的湖泊中; 桡足类分布在盐度范围为 $0\sim 46\text{ g/L}$ 的湖泊中; 无甲类分布在盐度范围为 $25\sim 76\text{ g/L}$ 的湖泊中。典型对应分析(CCA)表明, 盐度、捕食、海拔和pH与甲壳类动物的分布存在显著的相关关系。在淡水枝角类中, 大型蚤相对具有较宽的盐度耐受范围, 在盐度超过 5 g/L 的湖泊中也有分布, 西

藏蚤则广泛分布在盐度 $4\sim 28\text{ g/L}$ 的湖泊中, 其他种类只能分布在盐度低于 3 g/L 的湖泊中。在桡足类中, 西藏指镖水蚤和草绿巨剑水蚤为纯淡水种类; 亚洲后镖水蚤和咸水北镖水蚤为咸水种类; 拉达克剑水蚤、高原北镖水蚤和新月北镖水蚤在淡水和咸水湖泊中均有分布。无甲类只分布在盐度大于 25 g/L 的湖泊中。盐度超过 100 g/L 的湖, 没有浮游动物分布。

青藏高原气候变暖可以通过改变湖泊水温和盐度对湖泊生态系统产生影响。湖泊盐度的上升将降低湖泊生物多样性; 生态系统结构简单化, 敞水区食物链由三个营养级向两个营养级转变; 浮游动物由小型枝角类、轮虫和桡足类组成逐渐演替为大型滤食性枝角类占据优势, 随着盐度的继续上升, 大型滤食性枝角类又被无甲类所取缔, 大型滤食性枝角类(西藏蚤)或无甲类(卤虫)成为敞水区食物链中的最高营养级。湖泊盐度变化对浮游动物多样性的影响强度取决于食物链的长度, 两个营养级湖泊受影响程度比三个营养级湖泊更为强烈。在盐度为 $3\sim 5$ 或 $25\sim 28\text{ g/L}$ 左右的湖泊中, 浮游动物种类组成对盐度变化最为敏感。

温度上升对食物链各营养级间的相互作用产生影响, 影响程度取决于食物链的长度。在只有两个营养级的湖泊中, 水温的上升促进了食物链的传递效率, 导致高的浮游动物与浮游植物生物量比值和低的浮游植物生物量与总磷比值; 相反, 在有3个营养级的湖泊中, 水温的上升加剧了鱼类对浮游动物的捕食压力, 导致了更低的浮游动物与浮游植物生物量比值和更高的浮游植物生物量与总磷比值^[67]。

3 湖泊的补给条件与地表水循环

3.1 不同补给条件对湖泊变化的影响

作为青藏高原湖泊最重要的补给来源之一, 降水的变化能够更加直接地改变湖泊水量。例如, Zhou等人^[68]利用WEB-DHM(Water and Energy Budget-based Distributed Hydrological Model)模型研究发现, 暖季降水对色林错的水量变化量贡献显著。Yang等人^[69]利用降水与湖泊变化的关系模拟未来降水变化, 并预测了至2035年的湖泊变化。Ye等人^[70]研究认为, 羊卓雍错在1970~2000年水位下降, 与降水量减少有关。

湖泊变化对气候的响应不仅与降水等直接补给来源相关, 对于青藏高原的湖泊来讲, 也在气候变暖过程中受流域内冰川、冻土及积雪等的影响。研究表明, 气

温持续升高正在改变青藏高原冰冻圈结构,使得冰川、冻土等加速融化^[71],加大了对下游河流与湖泊的补给^[72]。相较于流域内无冰川、冻土及积雪分布的湖泊,气温主要通过影响蒸发从而改变湖泊的水量平衡。因此,在全球变暖条件下,青藏高原的湖泊对升温表现出显著的差异。Zhu等人^[41]利用观测数据计算了纳木错的水量平衡,发现1971~2004年期间,湖泊水量从 $783.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 $863.77 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。尽管冰川融水补给仅占总补给量的8.55%~11.48%,但冰川融水增加对湖泊总补给增量的贡献率则高达52.86%,显示气候变暖引起的冰川融水增加是引起近年纳木错湖面迅速扩张的主要原因。Song和Sheng^[73]通过分析羌塘地区东南部湖泊变化特征,认为冰川在此区域对湖泊变化有着重要的作用。Qiao和Zhu^[35]分析了高原西部4个湖泊的变化,并得出结论认为冰川融水加速了湖泊的扩张。Li等人^[38]通过分析高原面上湖泊变化的空间差异以及冻土分布状况,认为虽然降水是引起湖泊变化的主因,但冻土的存在对湖泊变化也有着重要的影响。Zhang等人^[74]通过提取湖泊流域内积雪面积及积雪日数年际变化,发现依布茶卡和色林错水位的上升均与流域内积雪面积变化显著相关。在青藏高原西部的玛旁雍错流域,1974~2003年间冰川面积从 107.92 km^2 减少到 100.39 km^2 ,但区域气候暖干化使得年降水量减少、蒸发量增大,冰川融化带来的补给并未能使湖泊发生明显扩张^[75]。由此可见,湖泊流域内冰川、冻土和积雪的存在,使得湖泊对气候的响应更为复杂。研究这些地理要素如何影响湖泊对气候变化的响应过程,有利于预测未来气候变化背景下湖泊的演化。

3.2 湖泊变化与西风季风环流及地表水循环的关系

与青藏高原单个大湖对气候变化的响应相比,空间分布广泛的湖泊群的变化则具有明显的时空特征。Wan等人^[20]通过对1975~2005年的湖泊面积变化研究,发现即使在气候条件相似的青藏高原东北部,湖泊变化也具有不同的特点:那曲地区和可可西里地区的湖泊总体呈扩张趋势,而黄河源区的湖泊则总体呈萎缩状态。通过对青藏高原大于 20 km^2 的109个内流封闭湖泊的面积遥感估算和部分湖泊的水位调查,Lei等人^[10]发现这些湖泊在1976~1999年的变化各不相同,但均在1999~2010出现了明显的扩张,并且具有高原北部扩张明显,南部扩张微弱的空间分布特征,认为尽管潜在蒸发减少和冰川融水增加可能有助于湖泊的扩张,但扩

张的主要原因还是区域降水增加,具有空间分异的原因可能与最近10余年季风区降水较少和西风区降水增加有关^[76]。进一步对其中典型湖泊水位监测和Cryosat卫星测高数据分析,结合大气降水和GRACE卫星数据指示的质量变化,认为高原中北部和东北部湖泊快速扩张主要受夏季降水显著增加影响,而高原西北部湖泊快速扩张更多与冰川消融和春节积雪增加变化有关^[29]。这一结论也得到对高原西北部34个湖泊面积和水量变化研究结果的支持^[35]。

从更多和更长时间的湖泊变化角度开展研究,青藏高原地区的湖泊变化及其原因不仅具有空间的分异,也在不同的时间段具有明显差异。Zhang等人^[26]以青藏高原68个具有卫星测高数据的湖泊为基础,对1970~2015年期间每年湖泊面积、水位、水量进行估算,发现青藏高原湖泊面积、水位与水量变化相似,并同时经历了3个阶段,即1970~1995年间略有减少、1996~2010年间快速增加、2011~2015年增速减缓。尽管其对2003~2009年期间影响水量平衡的各要素进行了详细研究,但由于这一时期的湖泊变化相似,很难区分大尺度的气候变化对湖泊变化的影响。Yang等人^[45]研究了青藏高原大于 50 km^2 的114个封闭湖泊的面积与水量变化,基本覆盖了湖泊分布的主要区域和类型。尽管仅比较了1976~1990, 1990~2000, 2000~2005及2005~2013年四期湖泊水量变化,但依然发现湖泊水量随时间变化具有3种类型且有明显的分布区域,并且受不同区域的气候变化影响。羌塘东南部和西北部以及阿里地区湖泊变化主要受降水增加影响,由平稳或缓升向急升转变;羌塘中部和昆仑山北部湖泊水量受降水和温度升高导致的冰川融水增加共同影响,先下降然后快速上升;而藏南湖泊的水量变化具有波动下降态势,与温度、降水的关系并不明显^[45]。以上分析可以发现,在降水主导的青藏高原湖泊变化的整体态势中,湖泊的时空变化特征可能敏感地反映了西风和季风降水的差异,而部分地区湖泊变化具有明显受冰川融水影响的现象,则说明西风和季风环流对地表水循环的影响过程和机制更为复杂。

4 第二次青藏高原综合科学考察中的湖泊变化研究

4.1 青藏高原湖泊变化研究面临的问题

青藏高原的湖泊变化对气候变化具有非常敏感的

响应,并且通过不同类型的补给变化反映气候变化及各要素的影响过程,开展更加精细的湖泊水量、盐度和水生生态系统变化研究,有助于深入理解气候变化对湖泊变化的影响程度,从而准确评判未来气候变化条件下的湖泊变化趋势。然而,目前的研究对湖泊水量与水生生态系统变化的覆盖范围、覆盖时间、变化时段等都还远远不够精细,对湖泊盐度的变化研究仅仅是在个别湖泊的水平,没有长时间大范围的湖泊盐度及变化数据支撑。因此,获取较高时空分辨率的青藏高原湖泊水量与盐度变化基础数据,认识湖泊生态系统与制约环境要素的关系,是开展定量分析湖泊变化与气候变化关系及时空特征的关键。

过去几十年遥感技术与数据的发展,使得利用卫星遥感数据已经较为容易和快捷地获取湖泊的面积指标。由于湖盆形状和岸线坡度的差异,不同湖泊之间的面积变化幅度与其水量变化幅度并不一致,导致不同湖泊之间面积变化幅度的比较不能反映水量变化程度的差异,需要根据湖盆数字高程模式(DEM)对每一个湖泊建立符合其本身特点的面积和水量关系。由于目前的DEM仅是描述水面以上的地形坡度,而在较长时期的湖泊变化历史中,湖泊面积和水量也会低于目前数值,需要通过湖泊水下地形数据验证低于目前水面时湖泊面积-水量变化关系的适用性。由于青藏高原湖泊数量众多,难以完成对每一个湖泊的实地测量,因此,在获得一定数量湖泊实测数据的基础上,利用水文相似性原理,可以完成更多湖泊的水下地形模拟,进而对位于相同气候区,具有近似补给条件和流域参数(流域面积与形态、湖泊面积与形态、地形坡度)的湖泊,通过流域DEM进行湖泊水下地形插值分析,获得大多数湖泊的水量及其变化,进而分析整个青藏高原湖泊水量的赋存及其变化。

湖泊透明度与盐度变化对湖泊生态系统具有重要的影响。因此,获取较高精度时间序列的湖泊透明度和盐度的变化,对于理解湖泊生态系统的气候变化响应具有重要意义。遥感影像提供了长时期、大范围的湖泊水色光谱数据,由于湖泊水色敏感地反映湖泊透明度变化,而水色与盐度之间也具有较好的相关性,因此具有利用遥感影像的湖泊水色数据重建湖泊透明度与盐度变化的基础。但由于遥感卫星过境时间和野外实测湖泊光谱、透明度与盐度的时间限制,这些参数并不总是能够具有较好的时间匹配,可能影响建立的湖泊水色-透明度/盐度之间定量关系的准确性。在野外进

行湖泊透明度/盐度实测时,同步进行水面光谱反射率测定,从而获得某一透明度/盐度条件下的现场水色反射率,通过在典型湖泊进行水面反射率和遥感卫星过境水色反射率之间的对比验证,获取高质量的卫星遥感水色反射率数据。对于遥感数据关键波段的选择,需在水体吸光度特征及水面光谱特征与水体透明度/盐度和离子浓度之间关系的分析基础上,选择特征波段或多波段数学关系组合,建立其与卫星遥感数据之间的关系,从而获得更加准确稳定的遥感卫星水色光谱和湖泊透明度/盐度之间的定量关系。

西风和季风是影响青藏高原地区的两大环流系统。近年来,西风和季风作用区出现了明显的降水分异。由于西风和季风作用区的主要地表覆被存在差异,在气候普遍升温的条件下,地表接受的热量及其扩散也具有不同,从而影响了陆面蒸发条件。青藏高原地区的湖泊除了受降水影响外,还与流域内的冰川融水、冻土退化等具有紧密联系。因此,青藏高原湖泊变化与西风和季风环流的关系更为复杂。通过研究获取年际尺度的大范围的湖泊水量、透明度与盐度变化数据,与流域尺度的气温、降水、蒸发、冰川融水、冻土变化等要素进行大数据分析,才能发现它们在不同时间和区域上的联系特点,从而评价西风和季风作用下的气候要素变化如何影响湖泊变化以及区域水循环过程。

4.2 第二次青藏高原综合科学考察的湖泊考察目标与内容

第二次青藏高原综合科学考察研究将聚焦水、生态、人类活动,着力解决青藏高原资源环境承载力、灾害风险、绿色发展途径等方面的问题。湖泊作为“亚洲水塔”的重要组成部分,其数量与质量变化是认识水、生态和人类活动相关关系的关键内容。通过考察,将获取较高时空分辨率的青藏高原湖泊水量、湖泊生态系统及其影响因子数据,认识和评判湖泊变化对气候变化和人类活动的响应过程、机制和程度。

青藏高原湖泊水量及其变化估算是湖泊考察的核心内容。利用卫星遥感影像,提取青藏高原大于 10 km^2 的400余个湖泊2000年的湖泊面积,在湖盆SRTM DEM数据(依据2000年卫星数据获得)的支持下,获取不同湖泊高程下对应的面积,分析湖泊面积变化与对应的水量变化,建立每个流域内湖泊面积-高程变化与湖泊水量变化之间的数量关系,并在具有不同形态(如圆形和方形、长条形、三角形)和湖盆地貌特点(如陡坡型、

缓坡型、陡坡与缓坡组合型)的湖泊流域中,完成约100个湖泊的水深调查,利用湖泊测深数据对低于2000年水位时的湖泊面积和水量变化的结果进行验证,从而获得准确的湖泊面积-水量变化之间的定量关系,基于遥感数据进行1980~2020年年际分辨率的湖泊面积反演,并进行湖泊年际水量变化的估算。

青藏高原湖泊透明度和盐度及其变化的估算有助于理解湖泊生态系统的变化。开展100个左右具有不同盐度梯度的湖泊透明度、表层水体盐度及阴阳离子浓度测定,并利用分光光度计同步测量对应水体的吸光度,利用光谱仪测量对应水体的水面反射特征,分析水体透明度、盐度及阴阳离子浓度与实测水面光谱及水体吸光度之间的关系,通过实测水色光谱与遥感卫星水色光谱之间的精度验证与比较,建立卫星遥感数据与湖泊透明度、表层水体盐度或离子浓度之间的定量反演关系,据此估算1980~2020年每个湖泊的湖水盐度及其变化特征。

针对青藏高原湖泊生态系统状态的主要表征指标类群进行调查和摸底。依据不同类型(营养梯度或盐度)的湖泊,开展包括浮游植物、浮游动物和底栖动物等

的种群结构、丰度等基础数据采样调查,分析不同类群生物对环境和空间变异的响应,以及在不同环境条件下影响下的进化差异,探明水生生物群落组成和多样性组成沿海拔、盐度、温度等环境梯度的变化格局,明确湖泊生态系统结构对气候变化和人类活动的直接和间接响应过程与机制。

分析青藏高原气候变化对湖泊变化影响过程的时空差异。在获取青藏高原封闭湖泊1980~2020年年际分辨率的湖泊水量、透明度和盐度变化基础上,通过流域尺度的湖泊水量、透明度和盐度变化与气温、降水、蒸发、冰川变化、冻土变化的大数据关系,分析具有相同变化时段不同空间区域和不同类型湖泊水量、透明度和盐度变化的差异以及影响这些差异的气象要素变化,分析具有相似湖泊类型(补给过程、气候区域)在不同时段内湖泊水量、透明度和盐度变化的差异以及影响这些差异的气象要素变化,基于湖泊生态系统与环境要素的调查数据,揭示湖泊水量、透明度与盐度年际变化的时空分布特征及其与气象要素变化之间的关系,揭示气候变化对湖泊变化的影响过程与程度。

参考文献

- 1 Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, 328: 1382–1385
- 2 Wan W, Long D, Hong Y, et al. Data descriptor: A lake data set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014. *Sci Data*, 2016, 3: 160039
- 3 Stocker D Q. Climate change 2013: The physical science basis. In: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013
- 4 Chen B, Zhang X, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agric For Meteorol*, 2014, 189-190: 11–18
- 5 Yang K, Wu H, Qin J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. *Glob Planet Change*, 2014, 112: 79–91
- 6 Lin C, Yang K, Qin J, et al. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960. *J Clim*, 2013, 26: 2891–2903
- 7 Zhang Y, Liu C, Tang Y, et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 2007, 112: D12110
- 8 Lu A X, Wang L H, Yao T D. The study of Yamzho Lake and Chencuo Lake variation using remote sensing in Tibet Plateau from 1970 to 2000 (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2006, 21: 173–177 [鲁安新, 王丽红, 姚檀栋. 青藏高原湖泊现代变化遥感方法研究. *遥感技术与应用*, 2006, 21: 173–177]
- 9 Wu Y, Zhu L. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co catchment, central Tibetan Plateau, during 1970–2000. *J Geogr Sci*, 2008, 18: 177–189
- 10 Lei Y, Yang K, Wang B, et al. Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change. *Clim Change*, 2014, 125: 281–290
- 11 Zhang G, Yao T, Xie H, et al. Lakes' state and abundance across the Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3010–3021
- 12 Shao Z, Meng X, Zhu D, et al. Characteristics of the change of major lakes on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 25 years. *Front Earth Sci China*, 2008, 2: 364–377
- 13 Biskop S, Maussion F, Krause P, et al. Differences in the water-balance components of four lakes in the southern-central Tibetan Plateau. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2016, 20: 209–225
- 14 Meng K, Shi X H, Wang E, et al. High-altitude salt lake elevation changes and glacial ablation in Central Tibet, 2000–2010. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 525–534

- 15 Nie Y, Zhang Y, Ding M, et al. Lake change and its implication in the vicinity of Mt. Qomolangma (Everest), central high Himalayas, 1970–2009. *Environ Earth Sci*, 2013, 68: 251–265
- 16 Bian D, Yang Z G, Li L, et al. The response of lake area change to climate variations in North Tibetan Plateau during last 30 years (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2006, 61: 510–518 [边多, 杨志刚, 李林, 等. 近30年来西藏那曲地区湖泊变化对气候波动的响应. 地理学报, 2006, 61: 510–518]
- 17 Wan W, Xiao P F, Feng X Z, et al. Remote sensing analysis for changes of lakes in the southeast of Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau in recent 30 years (in Chinese). *J Lake Sci*, 2010, 22: 874–881 [万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 近30年来青藏高原羌塘地区东南部湖泊变化遥感分析. 湖泊科学, 2010, 22: 874–881]
- 18 Yao X J, Liu S Y, Li L, et al. Spatial-temporal characteristics of lake area variations in Hoh Xil region from 1970 to 2011. *J Geogr Sci*, 2014, 24: 689–702
- 19 Huang L, Liu J, Shao Q, et al. Changing inland lakes responding to climate warming in Northeastern Tibetan Plateau. *Clim Change*, 2011, 109: 479–502
- 20 Wan W, Xiao P, Feng X, et al. Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 1021–1035
- 21 Song C, Huang B, Ke L, et al. Remote sensing of alpine lake water environment changes on the Tibetan Plateau and surroundings: A review. *ISPRS J Photogram Remote Sens*, 2014, 92: 26–37
- 22 Liu R X, Liu Y J. Area changes of Lake Qinghai in the latest 20 years based on remote sensing study (in Chinese). *J Lake Sci*, 2008, 20: 135–138 [刘瑞霞, 刘玉洁. 近20年青海湖湖水面积变化遥感. 湖泊科学, 2008, 20: 135–138]
- 23 Zhang G, Xie H, Duan S, et al. Water level variation of Lake Qinghai from satellite and *in situ* measurements under climate change. *J Appl Remote Sens*, 2011, 5: 053532
- 24 Song C, Huang B, Ke L. Inter-annual changes of alpine inland lake water storage on the Tibetan Plateau: Detection and analysis by integrating satellite altimetry and optical imagery. *Hydrol Process*, 2014, 28: 2411–2418
- 25 Yi G, Zhang T. Delayed response of lake area change to climate change in Siling Co lake, Tibetan Plateau, from 2003 to 2013. *Int J Environ Res Public Health*, 2015, 12: 13886–13900
- 26 Zhang G, Yao T, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 5550–5560
- 27 Liu T C. Changes of Yamzho Lake water-stage in Xizang (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 1995, 15: 55–62 [刘天仇. 西藏羊卓雍错水位动态研究. 地理科学, 1995, 15: 55–62]
- 28 Shi X, Zhang F, Tian L, et al. Tracing contributions to hydro-isotopic differences between two adjacent lakes in the southern Tibetan Plateau. *Hydrol Process*, 2014, 28: 5503–5512
- 29 Lei Y, Yao T, Yang K, et al. Lake seasonality across the Tibetan Plateau and their varying relationship with regional mass changes and local hydrology. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 892–900
- 30 Cui Y Y, Zhu L P, Ju J T, et al. Seasonal variations of water balance and supply process based upon discharge monitoring in Ranwu Lake of Southeast Tibet (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2017, 72: 1221–1234 [崔颖颖, 朱立平, 鞠建廷, 等. 基于流量监测的西藏东南部然乌湖水量平衡季节变化及其补给过程分析. 地理学报, 2017, 72: 1221–1234]
- 31 Kropáček J, Braun A, Kang S, et al. Analysis of lake level changes in Nam Co in central Tibet utilizing synergistic satellite altimetry and optical imagery. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 2012, 17: 3–11
- 32 Zhang G, Xie H, Kang S, et al. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003–2009). *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 1733–1742
- 33 Song C, Ye Q, Cheng X. Shifts in water-level variation of Namco in the central Tibetan Plateau from ICESat and CryoSat-2 altimetry and station observations. *Sci Bull*, 2015, 60: 1287–1297
- 34 Song C, Ye Q, Sheng Y, et al. Combined ICESat and CryoSat-2 Altimetry for Accessing water level dynamics of Tibetan lakes over 2003–2014. *Water*, 2015, 7: 4685–4700
- 35 Qiao B, Zhu L. Differences and cause analysis of changes in lakes of different supply types in the north-western Tibetan Plateau. *Hydrol Process*, 2017, 31: 2752–2763
- 36 Guo Y, Zhang Y, Ma N, et al. Long-term changes in evaporation over Siling Co Lake on the Tibetan Plateau and its impact on recent rapid lake expansion. *Atmos Res*, 2019, 216: 141–150
- 37 Li J L, Sheng Y W, Luo J C, et al. Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau (in Chinese). *J Lake Sci*, 2011, 23: 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. 湖泊科学, 2011, 23: 311–320]
- 38 Li Y, Liao J, Guo H, et al. Patterns and potential drivers of dramatic changes in Tibetan Lakes, 1972–2010. *PLoS One*, 2014, 9: e111890
- 39 Zhu L P, Wang J B, Ju J T, et al. Climatic and lake environmental changes in the Serling Co region of Tibet over a variety of timescales. *Sci Bull*,

- 2019, 64: 422–424
- 40 Qiao B, Zhu L, Yang R. Temporal-spatial differences in lake water storage changes and their links to climate change throughout the Tibetan Plateau. *Remote Sens Environ*, 2019, 222: 232–243
 - 41 Zhu L P, Xie M P, Wu Y H. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co basin of the Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1294–1303
 - 42 Yang R M, Zhu L P, Wang Y J, et al. Study on the variations of lake area & volume and their effect on the occurrence of outburst of MUDUI glacier lake in southeastern Tibet (in Chinese). *Progr Geogr*, 2012, 31: 1133–1140 [杨瑞敏, 朱立平, 王永杰, 等. 西藏东南部米堆冰湖面积和水量变化及其对溃决灾害发生的影响. *地理科学进展*, 2012, 31: 1133–1140]
 - 43 Lei Y, Yao T, Bird B W, et al. Coherent lake growth on the central Tibetan Plateau since the 1970s: Characterization and attribution. *J Hydrol*, 2013, 483: 61–67
 - 44 Song C, Huang B, Ke L. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sens Environ*, 2013, 135: 25–35
 - 45 Yang R, Zhu L, Wang J, et al. Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013. *Clim Change*, 2013, 140: 621–633
 - 46 Huang L, Wang J B, Zhu L P, 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 Geophys Res-Atmos*, 2017, 122: 13095–13107
 - 47 Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 1970, 170: 1088–1090
 - 48 Ju J, Zhu L, Wang J, et al. Water and sediment chemistry of Lake Pumayum Co, South Tibet, China: Implications for interpreting sediment carbonate. *J Paleolimnol*, 2010, 43: 463–474
 - 49 Qiao B, Wang J, Huang L, et al. Characteristics and seasonal variations in the hydrochemistry of the Tangra Yumco basin, central Tibetan Plateau, and responses to the Indian summer monsoon. *Environ Earth Sci*, 2017, 76: 162
 - 50 Wang H L, Zheng M P. Preliminary study of the correlation between hydrochemistry and salinity of lakes in the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2010, 84: 1517–1522 [王海雷, 郑绵平. 青藏高原湖泊水化学与盐度的相关性初步研究. *地质学报*, 2010, 84: 1517–1522]
 - 51 Li S J, Li W C, Xia W L, et al. The scientific expedition on the modern lake evolution in the Qinghai-Tibet Plateau: A preliminary report (in Chinese). *J Lake Sci*, 1998, 10: 95–96 [李世杰, 李万春, 夏威岚, 等. 青藏高原现代湖泊变化与考察初步报告. *湖泊科学*, 1998, 10: 95–96]
 - 52 Yang X. Diatom assemblages and quantitative reconstruction for paleosalinity from a sediment core of Chencuo Lake, southern Tibet. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2004, 47: 522–528
 - 53 Mischke S, Herzschuh U, Massmann G, et al. An ostracod-conductivity transfer function for Tibetan lakes. *J Paleolimnol*, 2007, 38: 509–524
 - 54 Guo Y, Zhu L, Frenzel P, et al. Holocene lake level fluctuations and environmental changes at Taro Co, southwestern Tibet, based on ostracod-inferred water depth reconstruction. *Holocene*, 2016, 26: 29–43
 - 55 Mitamura O, Seike Y, Kondo K, et al. First investigation of ultraoligotrophic alpine Lake Puma Yumco in the pre-Himalayas, China. *Limnology*, 2003, 4: 167–175
 - 56 Murakami T, Terai H, Yoshiyama Y, et al. The second investigation of Lake Puma Yum Co located in the Southern Tibetan Plateau, China. *Limnology*, 2007, 8: 331–335
 - 57 Yao Z, Wang R, Liu Z, et al. Spatial-temporal patterns of major ion chemistry and its controlling factors in the Manasarovar Basin, Tibet. *J Geogr Sci*, 2015, 25: 687–700
 - 58 Zhang Q, Kang S, Wang F, et al. Major ion geochemistry of Nam Co lake and its sources, Tibetan Plateau. *Aquat Geochem*, 2008, 14: 321–336
 - 59 Zhu L, Ju J, Wang Y, et al. Composition, spatial distribution, and environmental significance of water ions in Pumayum Co catchment, southern Tibet. *J Geogr Sci*, 2010, 20: 109–120
 - 60 Gao T G, Kang S C, Zhang Q G, et al. Major ionic features and their sources in the Nam Co Basin over the Tibetan Plateau (in Chinese). *Environ Sci*, 2008, 11: 3009–3016 [高坛光, 康世昌, 张强弓, 等. 青藏高原纳木错流域河水主要离子化学特征及来源. *环境科学*, 2008, 11: 3009–3016]
 - 61 Li H, Li J, Liu X L, et al. Composition characteristics and source analysis of major ions in four small lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China (in Chinese). *Environ Sci*, 2015, 2: 430–437 [李鹤, 李军, 刘小龙, 等. 青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析. *环境科学*, 2015, 2: 430–437]
 - 62 Wang J B, Zhu L P, Ju J T, et al. Water chemistry of eastern Nam Lake area and inflowing rivers in Tibet (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2009, 29: 288–293 [王君波, 朱立平, 鞠建廷, 等. 西藏纳木错东部湖水及入湖河流水化学特征初步研究. *地理科学*, 2009, 29: 288–293]
 - 63 Ju J T, Zhu L P, Huang L, et al. Ranwu Lake, a proglacial lake with the potential to reflect glacial activity in SE Tibet (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2015, 60: 16–26 [鞠建廷, 朱立平, 黄磊, 等. 基于监测的藏东南然乌湖现代过程: 湖泊对冰川融水的响应程度. *科学通报*, 2015, 60: 16–26]
 - 64 Ju J, Zhu L, Wang J, et al. Estimating the contribution of glacial meltwater to Ranwu Lake, a proglacial lake in SE Tibet, using observation data and

- stable isotopic analyses. *Environ Earth Sci*, 2017, 76: 229
- 65 Wang J B, Ju J T, Zhu L P. Water chemistry variations of lake and inflowing rivers between pre and post-monsoon season in Nam Co, Tibet (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2013, 33: 90–96 [王君波, 鞠建廷, 朱立平. 季风期前后西藏纳木错湖水及入湖河流水化学特征变化. *地理科学*, 2013, 33: 90–96]
 - 66 Liu C, Zhu L P, Wang J B, et al. Remote sensing-based estimation of lake water clarity and application in a typical lake on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Progr Geogr*, 2017, 36: 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. *地理科学进展*, 2017, 36: 597–609]
 - 67 Lin Q, Xu L, Hou J, et al. Responses of trophic structure and zooplankton community to salinity and temperature in Tibetan lakes: Implication for the effect of climate warming. *Water Res*, 2017, 124: 618–629
 - 68 Zhou J, Wang L, Zhang Y, 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. *Water Resour Res*, 2015, 51: 8060–8086
 - 69 Yang K, Lu H, Yue S, et al. Quantifying recent precipitation change and predicting lake expansion in the Inner Tibetan Plateau. *Clim Change*, 2018, 147: 149–163
 - 70 Ye Q, Zhu L, Zheng H, et al. Glacier and lake variations in the Yamzhog Yumco basin, southern Tibetan Plateau, from 1980 to 2000 using remote-sensing and GIS technologies. *J Glaciol*, 2007, 53: 673–676
 - 71 Kang S, Xu Y, You Q, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau. *Environ Res Lett*, 2010, 5: 015101
 - 72 Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature*, 2019, 569: 649–654
 - 73 Song C, Sheng Y. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis. *Clim Change*, 2016, 135: 493–507
 - 74 Zhang G Q, Xie H J, Yao T D, et al. Snow cover dynamics of four lake basins over Tibetan Plateau using time series MODIS data (2001–2010). *Water Resour Res*, 2012, 48: W10506
 - 75 Ye Q H, Yao T D, Zheng H X, et al. Glacier and lake co-variations and their responses to climate change in the Mapam Yumco Basin on Tibet (in Chinese). *Geogr Res*, 2008, 27: 1178–1190 [叶庆华, 姚檀栋, 郑红星, 等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变及其对气候变化的响应. *地理研究*, 2008, 27: 1178–1190]
 - 76 Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 663–667

Summary for ““亚洲水塔”的近期湖泊变化及气候响应: 进展、问题与展望”

Recent lake changes of the Asia Water Tower and their climate response: Progress, problems and prospects

Liping Zhu^{1,2,3*}, Jianting Ju¹, Baojin Qiao^{1,4}, Ruimin Yang⁵, Chong Liu^{1,3} & Boping Han⁶

¹ Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ Institute of Smart City, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

⁵ College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

⁶ Department of Ecology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

* Corresponding author, E-mail: lpzhu@itpcas.ac.cn

The Tibetan Plateau has many endorheic lakes which are an important part of the Asia Water Tower. In recent decades, the warming rate of the Tibetan Plateau is two times higher than the global average, and precipitation also has obvious increase. As the largest cryosphere system in the middle and low latitudes, the temperature and precipitation changes in the Tibetan Plateau have profound impacts on the lakes in the region. Before 1990, low temperature caused negative balance of lake water storage by suppressing melting water. In 1990–2000, increase of lake water storage was promoted by temperature increase. After 2000, precipitation is the dominant factor causing the increase of lake water storage, but the continuous temperature rise in 2005–2013 strengthened evaporation and weakened the increase of lake water storage. Glaciers have different impacts on lake water storage. During the period of 2000–2013, glacier melting water contribution to lake water increase in the central and northwest parts of the Tibetan Plateau is up to 50% and 100%, respectively. Changes in water quantity and salinity are the results of lake water budget under climate change, which are important indicators and their temporal and spatial characteristics may reflect the influence of the westerly and Indian monsoon on land surface water cycle. The trend of the lake water storage in different parts of the Tibetan Plateau from 1970s to 2013 is consistent with that of precipitation in the westerly and Indian monsoon-controlled areas. It is found that with the increase of lake water storage, the salinity of lakes generally decreases in the Serling Co area. The physical and chemical properties of lake water are important factors affecting lake ecosystems, and their changes under different climatic conditions have profound impacts on the composition and trend of lake ecosystems. Increase in water temperature promotes the transmission efficiency of food chain, which leads to high ratio of zooplankton to phytoplankton and low ratio of phytoplankton to total phosphorus. Decrease in lake salinity increases the biodiversity and makes lake ecosystem structure relatively complex. In lakes with salinity of about 3–5 or 25–28 g/L, zooplankton species composition is the most sensitive to salinity change. Based on the analyses of the relationships among lake area, water level, water quantity, water physicochemical parameters and climate changes in the Tibetan Plateau, this paper reviews the research progress on lakes as a response to climate change in the region, and puts forward the main objectives and tasks of the lake research in the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition Program.

Tibetan Plateau, Asia Water Tower, lake area and water storage, physical and chemical properties, plankton, the westerly and Indian monsoon

doi: [10.1360/TB-2019-0185](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0185)