

# 中国阿牙克库木湖水量变化及其驱动机制

陈 军<sup>1,2</sup>, 汪永丰<sup>1</sup>, 郑佳佳<sup>2</sup>, 曹立国<sup>3</sup>

(1. 安徽建筑大学环境与能源工程学院, 合肥 230601; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093;  
3. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

**摘要:** 融合卫星雷达测高(T/P、RA-2和Hydroweb)与光学遥感数据分析了一个长时间序列的阿牙克库木湖水位及面积变化趋势,并基于NDSI和监督分类的方法提取了湖泊补给冰川的面积。结果表明:阿牙克库木湖在监测期内逐年扩大,面积由1995年的624 km<sup>2</sup>逐年扩张到2015年的995 km<sup>2</sup>,在此期间水位总共上升了5 m。气温升高导致补给冰川持续消融,冰川面积由1994年的361.27 km<sup>2</sup>退缩到2016年的345.26 km<sup>2</sup>。区域气候的暖湿化是1995-2015年阿牙克库木湖水量增加的主要背景,流域降水量的增加对湖泊水位上升产生直接驱动,持续升高的气温导致的补给冰川消融对湖泊扩张具有重要的促进作用。此外,最大可能蒸散、高海拔降水(雪)、冻土融化等因素也对湖泊的扩张产生重要影响。总之,准确把握阿牙克库木湖的水量及其对气候变化的响应,对深刻理解青藏高原北部边缘的水资源平衡研究具有重要意义。

**关键词:** 阿牙克库木湖; 雷达测高; 湖泊范围; 水位; 气候变化

作为全球气候变化敏感的响应区以及中国气候变化的启动区<sup>[1]</sup>, 青藏高原在过去半个世纪以来呈现出持续的增温趋势<sup>[2]</sup>, 平均温度每十年上升0.16 °C<sup>[3]</sup>, 其中高原北部和西南部的升温趋势高于东南部。在此背景下, 除青藏高原东南部由于降水减少而导致暖干化之外<sup>[4]</sup>, 高原其他地区在20世纪末至21世纪初均由暖干化向暖湿化转变<sup>[5-6]</sup>。作为陆地水循环的重要组成部分<sup>[7]</sup>, 湖泊对气候的波动十分敏感, 因此成为气候与环境变化的指示器<sup>[8]</sup>。青藏高原的内陆湖泊受人类活动影响相对较小, 因此它们的变化一定程度上能够直接反映为区域的气候与环境变化<sup>[9]</sup>。青藏高原气候的干湿变化对内陆湖泊的水量变化产生直接影响<sup>[6]</sup>, 过去几十年青藏高原湖泊总体上呈现出扩张的趋势<sup>[10]</sup>, 但湖泊变化体现出明显的区域差异性: 青藏高原东南部的湖泊以萎缩趋势为主<sup>[11]</sup>, 而北部和中部的湖泊却以扩张为主<sup>[12]</sup>, 特别是在2000s-2010s期间受暖湿化的驱动湖泊扩张速度明显加快<sup>[13]</sup>。充分认识青藏高原的内陆湖泊, 不仅能更好地维持高原地区的水资源平衡, 还能保护当地脆弱的生态环境, 甚至能够为全球气候变化研究提供科学依据。

当前, 青藏高原湖泊变化已被广泛研究, 比如: 记录湖泊的基本特征<sup>[14]</sup>、估算湖泊的水量平衡<sup>[15]</sup>、探讨湖泊对冰川变化的响应机制<sup>[16]</sup>、揭示内陆湖泊与气候变化的耦合关系等<sup>[17]</sup>。然而, 长时间序列的湖泊监测大多集中在人类活动频繁的地区, 如青海湖<sup>[18]</sup>、纳木错<sup>[19]</sup>等。对地处偏远、环境恶劣、且难以获得稳定的气象及水文站点数据的内陆湖泊研究较少。遥感技术的出现为这些湖泊的研究提供了极大便利, 目前该技术已经被成功地应用于大空间尺度、长时间序列的青藏高原湖泊动态监测。卫星雷达测高数据具有

收稿日期: 2018-12-03; 修订日期: 2019-03-22

基金项目: 安徽省教育厅高校自然科学研究项目(KJ2018JD08); 国家自然科学基金项目(41371391)

作者简介: 陈军(1984-), 男, 安徽宣城人, 博士, 高级工程师, 研究方向为遥感地学分析、资源环境遥感。

E-mail: gischen@126.com

全天候、实时的特点<sup>[20-21]</sup>，能够为湖泊、河流等内陆水体的水位监测提供有效、高精度的数据支持<sup>[22]</sup>。

本文通过高程坐标系统转换与重复数据的比测计算，融合多种卫星雷达测高数据（T/P、RA-2、Hydroweb），并采用Landsat影像完成了一个长时间序列的阿牙克库木湖水水量变化监测。此外，结合GLIMS全球陆地冰川数据与Landsat影像估算出监测期内湖泊补给冰川的面积变化情况，并选取距离湖泊最近的4个气象站的线性插值进而获取的气象数据来分析湖泊变化对气候波动的响应机制，希望能够为青藏高原边缘地区的水资源平衡研究提供帮助。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

阿牙克库木湖是中国十大湖泊之一，位于青藏高原北部边缘，是阿尔金山与昆仑山之间内陆流域的一个大型咸水湖，行政上隶属于新疆维吾尔自治区若羌县，处于中国最大的自然保护区——阿尔金山自然保护区范围内。湖泊的面积约为800 km<sup>2</sup>，水面高程大约为3880 m，最大水深约为24 m，流域面积为25244 km<sup>2</sup>。依协克帕提河和色斯克亚河等间歇性内陆河流成为湖水的重要补给来源，此外，来自南部的阿尔喀山、西部的库木布彦山、东北部的祁漫塔格山上的冰川融水对湖泊的补给也发挥着越来越重要的作用（图1）。阿牙克库木湖流域处于干旱区，气候寒冷，年降水量约为100 mm，且85%的降水量集中在5-8月。

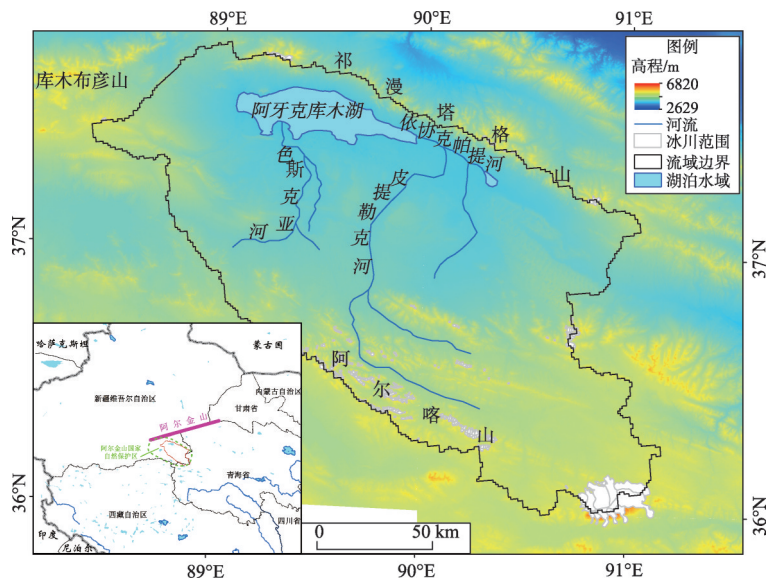


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area on the Tibetan Plateau

1.2 数据及处理过程

湖泊水量变化受到整个流域范围内的气温、降水、蒸发以及冰川补给等因素的综合影响，因此本文直接采用全球流域数据库（GDBD）<sup>[23]</sup>来确定阿牙克库木湖的流域范围线。

### 1.2.1 Landsat影像及处理过程

光学影像主要采用由美国地质调查中心(USGS)提供的Landsat系列TM/ETM+/OLI影像。补给冰川的消融一般发生在夏季,为了更有效地探讨湖泊面积变化与冰川融化之间的关系,从每年的7-9月份中分别选出行列号为140/36的高质量夏季无云影像,采用NDWI水体指数自动提取监测期内21个年份的阿牙克库木湖水域边界<sup>[24]</sup>。

考虑到冰川范围年际变化幅度很小,因此以大约10年为间隔,分别在1994年、2006年、2015年中选取行列号为139/34、139/35、140/34、140/35的夏季无云影像,采用雪盖指数法(NDSI)自动提取冰川的范围。湖泊流域内存在少量的表碛覆盖型冰川,表碛物底部为活动的冰体,因此其表面运动特征(纹理)明显,与周边固定的岩体存在显著差别。此外,相对于周边陡峭山体,表碛覆盖的冰川前缘地区地形较为平缓。基于以上分类特征,并根据表碛覆盖物往往分布在冰舌区的特点,在表碛覆盖型冰川的冰舌区域单独采用监督分类的方法进行冰川识别。无论是基于NDSI自动提取洁净冰川,还是基于监督分类提取表碛覆盖型冰川,对某些细部边界提取效果较差,因此在冰川面积统计前都需要采用专家经验法进行辅助判读。

USGS提供的Landsat影像是经过系统辐射校正、地面控制点几何校正以及DEM地形校正的L1T产品,所有波段的影像被投影到统一的UTM-WGS84坐标系<sup>[25]</sup>。定标后TM/ETM和OLI影像名义上的辐射定标精度均小于5%<sup>[26]</sup>,地理精度均小于半个像元<sup>[27]</sup>,但是影像对影像的匹配精度却低于 $\pm 50\text{ m}$ <sup>[28]</sup>。因此为了满足基于不同类型和时期的Landsat影像进行冰川和水域面积监测的精度要求,需要对被选取的高质量无云影像进行进一步的坐标校准与图像匹配,匹配方法选用周边均匀分布的共计26个固定不动山峰点作为稳定的地面控制点进行影像配准。通过实验发现经过坐标配准后项目区影像对影像的匹配精度好于一个像元。通过以上的精度对比和配准处理,基于NDWI提取的湖泊水域和融合NDSI和监督分类提取的冰川的边界线位置偏移量也小于一个像元,对应的TM/ETM+和OLI影像的精度分别好于 $\pm 30\text{ m}$ 和 $\pm 15\text{ m}$ 。综上,基于Landsat系列影像进行的湖泊水域以及补给冰川范围提取能够满足长时间序列面积变化研究的要求。

### 1.2.2 卫星雷达测高数据及处理过程

阿牙克库木湖水位测量涉及的两种不同卫星雷达测高数据包括:法国空间研究中心(CNES)和美国国家航空航天局(NASA)提供的TOPEX/Poseidon(T/P)数据,由欧洲航天局(ESA)提供ENVISAT RA-2数据。通过归一化密度分布的方法对异常高程值进行剔除之后发现,1995年以前的T/P数据落入湖泊的有效高程点很少,无法建立完整的时间序列,而且T/P卫星的轨道在2002年9月发生调整。综上,基于T/P数据的水位变化监测周期设置为1995-2002年。ENVISAT卫星在2012年4月失效,因此基于RA-2数据的观测周期被设置为2002-2012年。为了保证湖泊水位监测的连续性,对于某些时段缺失的高程数据,采用法国Hydroweb提供的水位信息进行补充<sup>[29]</sup>。Hydroweb通过对T/P、Jason-1/2、ENVISAT、GFO等雷达测高数据的融合,提供了全球主要河流、湖泊以及部分湿地的水位数据<sup>[30]</sup>。

落入湖泊的高程数据的回波波形经常会被污染<sup>[31]</sup>,因此需要采用对内陆水体的水位测量具有较高精度的ICE-1算法进行重跟踪处理<sup>[32-33]</sup>。为了保证融合两种测高数据进行高程测量结果的一致性,本文先通过一个转换常数( $-0.71\text{ m}$ )将两种不同椭球系统进行转换(T/P和RA-2数据分别采用Topex/Poseidon和WGS84椭球系统)<sup>[34]</sup>,然后通过将T/P

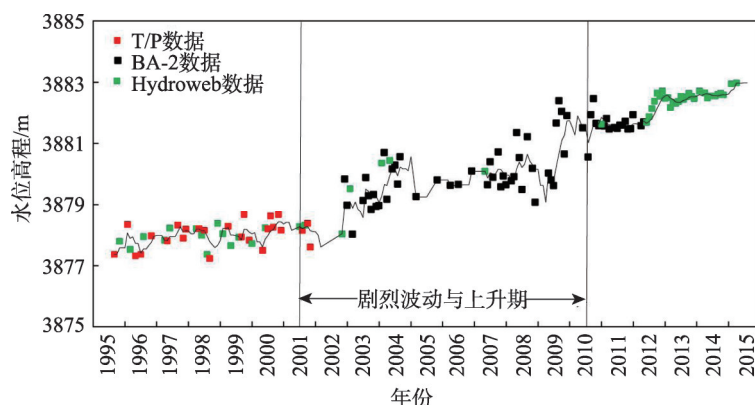


图2 基于卫星雷达测高的有效高程数据组合

Fig. 2 The valid data combined from three radar altimetry data

与RA-2重合的相同或者相似日期水位测量结果的比测分析来消除不同类型测高数据的系统高差。通过计算卫星测高相同轨道的升轨和降轨交叉点高程数据的中误差可以评估测高数据的高程精度<sup>[35]</sup>，本文的实验表明，基于T/P和RA-2数据的阿牙克库木湖水位测量的中误差分别为 $\pm 0.36$  m和 $\pm 0.18$  m。通过对主要湖泊的验证证明Hydroweb提供的水位信息具有较高的精度<sup>[36]</sup>，阿牙克库木湖的Hydroweb水位信息虽未被直接验证，但是通过Hydroweb与RA数据相同（相近）日期的水位进行相关性分析发现，二者的相关性达到99.1%。综上，相对于长时间序列的湖泊水位趋势分析，基于TP、RA-2、Hydroweb数据能够满足精度要求。

### 1.2.3 其他数据及处理过程

阿牙克库木湖流域范围内没有固定的气象观测站点<sup>[37]</sup>，因此气象数据选取距离湖泊最近的四个气象站数据（茫崖、冷湖、且末和若羌），通过对四个气象站的气象数据的线性插值可有效地评估湖泊所处的阿尔金山地区的气候变化。此外，全球陆地冰空间监测计划（GLIMS）提供的冰川数据库被用来评估湖泊补给冰川的变化情况<sup>[38]</sup>。为了更准确地提取表碛覆盖型冰川边界，在地形辅助判断中采用了SRTM数字高程模型。

## 2 结果分析

### 2.1 湖泊面积与水位变化

基于Landsat影像的湖泊水域范围变化监测结果表明：1995-2015年阿牙克库木湖呈现出逐年扩大的趋势，且水域扩张集中在东部的依协克帕提河口和南部的色斯克亚河口（图3）。

湖泊面积扩张体现出显著的时间差异性：在1995-2000年呈现出轻微的扩张态势，湖面年均扩张 $11.1 \text{ km}^2$ 。湖泊面积在2001-2010年呈现出剧烈增加的趋势，增加幅度达到 $25.33 \text{ km}^2/\text{年}$ 。接下来的2011-2015年湖泊进入平稳扩张的时期，年均扩张 $10.13 \text{ km}^2$ 。监测期内阿牙克库木湖面积由 $624 \text{ km}^2$ 逐步扩张到 $995 \text{ km}^2$ （图4）。

阿牙克库木湖的结冰期从11月底一直持续到来年的5月初<sup>[39]</sup>，湖冰的存在使其表面累积的积雪对高程测量产生负面影响。同时，5-8月是湖泊流域主要的降水季节，突发性的雨量增大导致湖泊水位的波动较大。综上，本文选择10月底、11月初作为阿牙克库木



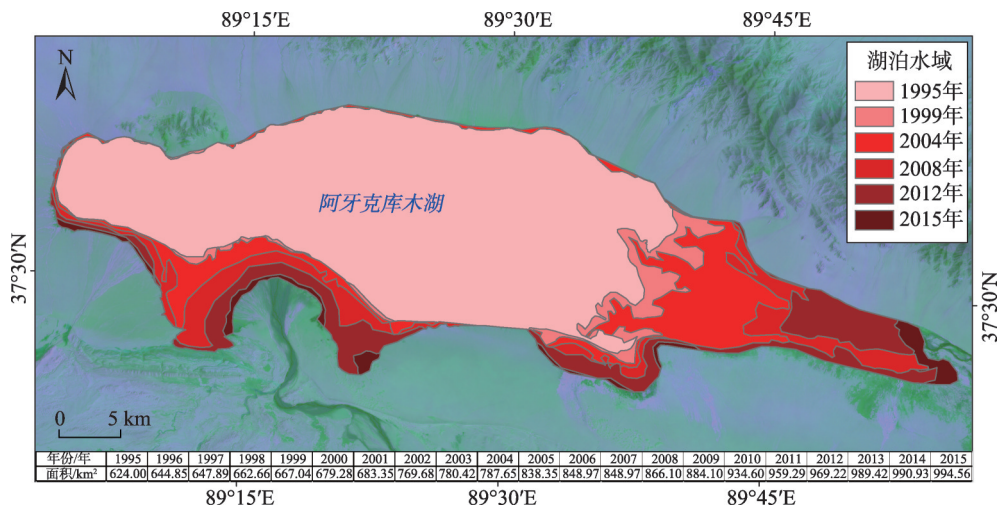


图3 基于Landsat影像的1995-2015年阿牙克库木湖时空变化

Fig. 3 The spatiotemporal changes of Ayakekumu Lake during 1995-2015 derived from Landsat image

湖水位长时间序列趋势分析的对比时段。与阿牙克库木湖的面积持续扩张一致, 1995-2015年湖泊水位变化也呈现出显著的升高趋势。融合多种卫星雷达测高数据建立水位时间序列也体现出与面积变化一致的时间分布特征: 湖泊水位在1995-2000年只是轻微的上升, 上升幅度仅为0.12 m/年, 而在2001-2010年间却呈现出剧烈升高的趋势, 年均升高幅度高达0.34 m/年, 接下来的2011-2015年湖泊水位又恢复了平稳升高的趋势, 年均升幅为0.18 m/年。监测期内阿牙克库木湖的水位总共上升了5 m (图5)。

## 2.2 湖泊流域范围内的气温、降水量以及冰川面积变化

过去40年, 虽然青藏高原南部和西部的降水量出现轻微减少或者总体稳定的趋势<sup>[40]</sup>, 但是北部和东部却出现增加趋势。4个气象站在过去几十年的年均降水量数据符合了区域降水量变化特征, 总体上呈现出增加趋势。与湖泊水量变化趋势一致的是, 降水量在2001-2010年也体现出剧烈波动与偏多的现象 (图6), 这解释了为什么该时段测高数据的高程值出现剧烈波动与快速上升的现象, 直接证明了流域降水量的变化对湖泊水位波动产生直接的驱动作用。

冰川融水对阿牙克库木湖的补给起着重要作用。通过对GLIMS数据的分析, 发现阿牙克库木湖流域内共有296条大小不一的冰川, 主要分布在阿尔喀山和祁漫塔格山上 (图1)。相关研究表明: 1961-2010年阿尔金山区域温度升高幅度为每十年0.41 °C, 而且

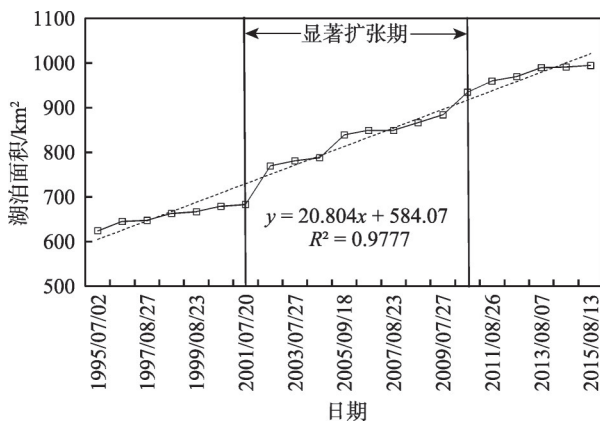


图4 基于Landsat影像的1995-2015年阿牙克库木湖面积时间序列

Fig. 4 The lake area time series of Ayakekumu Lake during 1995-2015 derived from Landsat images

1990s以后维持在半个世纪以来的气温高位<sup>[41]</sup>,但该时段的气温年升高幅度略低。基于4个气象站的气温数据显示,1995-2015年研究区气温变化趋势也体现出较显著的增温趋势,年均增温0.02℃,然而与补给冰川融化直接相关的夏季平均气温的上升幅度却较为温和(图7),年均增温约为0.01℃。但相关研究表明,同一地区海拔越高夏季升温趋势越明显,因此冰川分布区可能比其他地区的增温趋势更显著<sup>[41-42]</sup>,进而导致冰川退缩率的加快。1994年、2006年和2016年冰川面积分别为361.27 km<sup>2</sup>、353.13 km<sup>2</sup>和345.26 km<sup>2</sup>,1994-2006年和2006-2016年冰川退缩率分别为0.19%/年和0.22%/年。

### 2.3 湖泊水量变化对气候变化响应机制探讨

在稳定气候环境下,仅考虑降水补给为主的湖泊水量平衡与气候的关系可简化为<sup>[43]</sup>:

$$\frac{A_b}{A_L} = \frac{E-P}{rP} + 1 \quad (1)$$

式中:  $A_b$ 和 $A_L$ 分别指流域和湖泊的面积;公式左边的两者之比被定义为湖泊补给系数;而公式右边则表示为气候函数; $P$ 和 $E$ 分别为湖泊降水量和蒸发量; $r$ 为径流系数。公式两边若

不相等表示湖泊处于变化中;当湖泊补给系数大则表示湖泊处于扩张状态;若气候函数大则表示湖泊处于萎缩状态<sup>[43]</sup>。湖泊的补给系数越大,那么湖泊受到入湖水量的影响越大,而湖泊的水量变化也越剧烈,阿牙克库木湖流域面积为25244 km<sup>2</sup>,监测期内湖泊平均面积为810 km<sup>2</sup>,计算补给系数得31.4。相对于同为藏北湖泊的多格错仁(19.33)和强错(28.84)<sup>[44]</sup>,阿牙克库木湖属于高补给系数湖泊。虽然阿牙克库木湖地处藏北东段的干旱地区,但是周边陡峭的高山所形成的低气温条件,有利于固体降水的凝聚(降水增加而蒸发减少),另一方面陡峭的山区地形有利于径流形成(增大净流系数 $r$ )<sup>[44]</sup>。再加上区域降水量增加和蒸发减少的大背景,补给系数大大高于气候函数使得阿牙克库木湖呈现出显著扩张的趋势。

20世纪后几十年,青藏高原的年均降水量以1.196 mm/年的速度增加<sup>[45]</sup>,特别是高原北部地区的降水量增加更为显著<sup>[46]</sup>。在此背景下,地处藏北高原的柴达木盆地湖泊的水

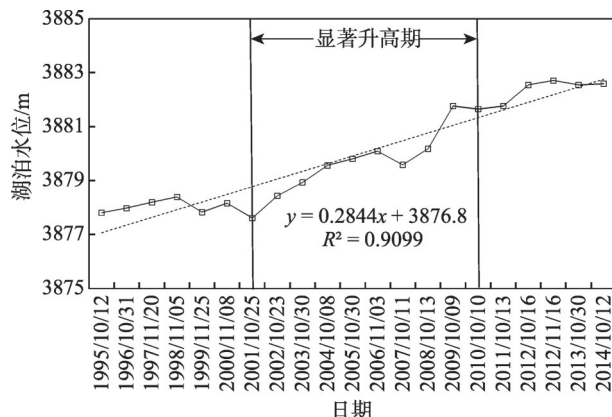


图5 基于雷达测高的1995-2015年阿牙克库木湖水位时间序列

Fig. 5 The lake level time series of Ayakekumu Lake during 1995-2015 derived from radar altimetry

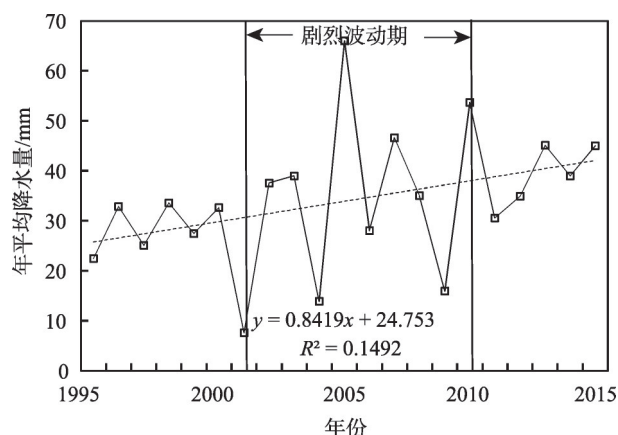


图6 1995-2015年阿牙克库木湖流域年平均降水量变化  
Fig. 6 Change trend of annual precipitation over Ayakekumu Lake basin during 1995-2015

量变化主要受降水量变化的直接驱动<sup>[47]</sup>。与藏北高原近期的暖湿化趋势一致的是<sup>[5-6]</sup>,阿尔金山地区气温和降水量的增加共同作用推动着该区域的暖湿化,而暖湿化是阿牙克库木湖水量增加的主要驱动因素,特别是监测期内降水量变化对湖泊水位的上升产生最直接驱动作用,如1995-2015年阿牙克库木湖的降水量与湖泊水量的年际变化展现出一致的时间分布特征。但是流域内降水量和湖泊水位之间较低的正相关系数也证明了仅依靠单纯的流域降水量增加对湖泊扩张产生的驱动力较小(图8b)。因此需要考虑高海拔的高山降水(雪)的影响,阿牙克库木湖流域的东部、北部,特别是东南部广泛分布着超过4000 m高山,由于地形对水汽的抬升作用,导致高山上的降水大于山谷地区,然而这种高海拔高山降水(雪)是很难定量评估的,目前相关研究主要停留在定性研究与推测上。

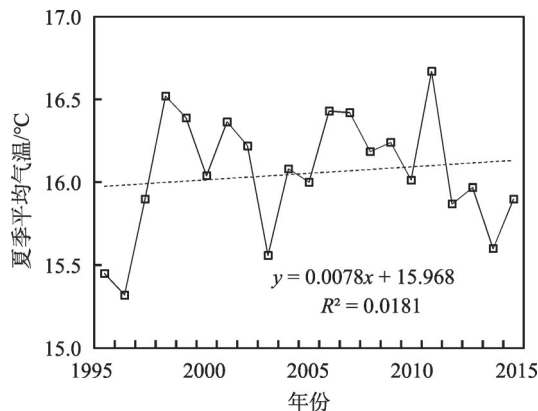


图7 1995-2015年阿牙克库木湖流域夏季平均气温变化

Fig. 7 Change trend of summer air temperature over Ayakekumu lake basin during 1995-2015

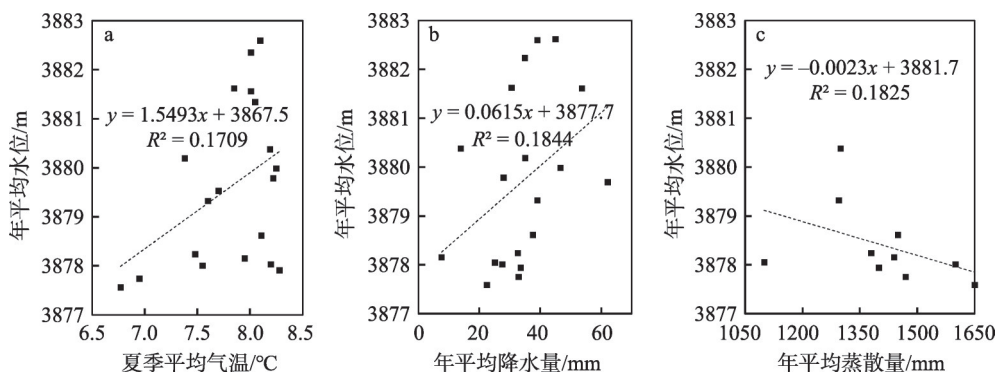


图8 湖泊年平均水位与夏季平均气温、年平均降水量、年平均蒸发量的互相关性分析

Fig. 8 The relationship between annual lake level and summer average temperature, precipitation, and evaporation, respectively

青藏高原不同的湖泊受到不同气候因素的影响,但是总体上受气温上升的控制作用最为显著<sup>[40]</sup>。1995-2015年阿牙克库木湖流域的气温呈现出升高趋势。一般认为气温对湖泊起负效应作用,而图8a却反映出湖泊水位与气温存在着正相关关系。导致这种异常的原因是:如果湖泊流域内有众多的补给冰川时,那么地处高海拔、干旱地区的湖泊对气温的敏感性会更强<sup>[5]</sup>,而且气温会对湖泊变化起着正效应作用<sup>[43]</sup>。由于青藏高原气温的持续升高导致了高海拔地区以冰川补给为主导的湖泊水位迅速上升<sup>[11]</sup>,特别是藏北高原的湖泊面积扩张受到冰川融化增加的主导<sup>[48-49]</sup>。受阿牙克库木湖流域持续增温的影响,监测期内湖泊的补给冰川也体现出持续退缩的趋势。湖泊水位与气温之间的正相关系数以及水位与补给冰川之间的负相关系数,都在一定程度上证明了在过去几十年阿牙克库木湖水量增加的重要驱动机制是温度上升导致的冰川融化加剧,冰雪融水的加大打破了原有

封闭内陆湖泊补给状态的稳定。此外,青藏高原的湖泊水量变化还受到多年永久性冻土消融而导致的地下水补给增加的影响<sup>[50]</sup>。当前由于冻土消融而导致的湖泊扩张主要集中在青藏高原南部<sup>[40]</sup>,但随着气候变暖的持续,青藏高原北部广泛分布着的多年永久性冻土<sup>[51]</sup>面临的潜在威胁会更大,这给该区域湖泊未来的稳定性带来巨大的不确定性。

湖泊水量平衡除了考虑水量补给之外,还应当考虑水量损失,阿牙克库木湖属于高山内陆湖,不需要考虑外流量,湖水下渗也比较稳定,因此水量损失变化方面主要考虑蒸发量。青藏高原的最大可能蒸散量在20世纪后几十年以1.914 mm/年的速度减小,导致高原干燥度以平均每年0.001的速度下降<sup>[45]</sup>。阿牙克库木湖所处的藏北高原的蒸发量在1971-2006年间也体现出下降趋势<sup>[48]</sup>。其主导因素与该区域相对湿度的增加、气温日较差的减小以及日照时数的减少有关,此外,降水量的增加和平均风速的减少也在一定程度上影响着该区域蒸发量的减小<sup>[52]</sup>。本文参考边多等人计算的1995-2004年藏北高原的蒸发量数据<sup>[48]</sup>,并与湖泊水位做相关性分析(图8c),结果表明:过去二十年阿牙克库木湖的蒸散量减少对湖泊的水位上升起到一定的促进作用。

### 3 结论

本文融合卫星雷达测高与光学遥感数据监测阿牙克库木湖的水量变化,研究结论如下:

(1) 1995-2015年阿牙克库木湖面积由624 km<sup>2</sup>逐年扩张到995 km<sup>2</sup>,水域扩张主要集中在两条主要补给河流的河口处。与此同时,湖泊水位也呈现出显著上升的趋势,监测期内湖泊水位总共上升了5 m。

(2) 气温的上升导致了补给冰川出现持续的退缩,冰川面积由1994年的361.27 km<sup>2</sup>退缩到2016年的345.26 km<sup>2</sup>。

(3) 区域气候的暖湿化是1995-2015年阿牙克库木湖水量增加的主要背景,流域降水量的增加对湖泊水位上升产生直接驱动,其中高海拔高山降水(雪)具有不可忽视的作用。同时,补给冰川消融的加剧,最大可能蒸散的减小等因素都促使了湖泊水量的正平衡效应。

基于卫星遥感对湖泊进行大面积、长时间序列的动态监测意义重大,能够为自然条件恶劣、人迹罕至且缺少稳定实测数据的青藏高原湖泊研究提供重要的数据支撑。

### 参考文献(References):

- [1] 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636. [FENG S, TANG M C, WANG D M. New evidence for the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as a pilot region of climatic fluctuation in China. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 633-636.]
- [2] SALAMA M S, VELDE R V D, ZHONG L, et al. Decadal variations of land surface temperature anomalies observed over the Tibetan Plateau by the Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) from 1987 to 2008. Climatic Change, 2012, 114(3-4): 769-781.
- [3] PARRY M L, CANZIANI O F, PALUTIKOF J P, et al. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] GAO Y H, LI X, LEUNG L R, et al. Aridity changes in the Tibetan Plateau in a warming climate. Environmental Re-



- search Letters, 2015, 10(3): 34013-34024.
- [5] DONG S Y, PENG F, YOU Q G, et al. Lake dynamics and its relationship to climate change on the Tibetan Plateau over the last four decades. *Regional Environmental Change*, 2017, 18(2): 477-487.
- [6] 姜永见, 李世杰, 沈德福, 等. 青藏高原近 40 年来气候变化特征及湖泊环境响应. *地理科学*, 2012, 32(12): 1503-1512. [JIANG Y J, LI S J, SHEN D F. Climate change and its impact on the lake environment in the Tibetan Plateau in 1971-2008. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(12): 1503-1512.]
- [7] 张振克, 王苏民, 吴瑞金, 等. 中国湖泊水资源问题与优化调控战略. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 16-21. [ZHANG Z K, WANG S M, WU R J. et al. Problems and optimum control strategy of lake water resources in China. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 16-21.]
- [8] 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望. *地理学报*, 1990, 44(1): 1-13. [SHI Y F. Glacier recession and lake shrinkage indicating the climatic warming and drying trend in central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 44(1): 1-13.]
- [9] 乔程, 骆剑承, 盛永伟, 等. 青藏高原湖泊古今变化的遥感分析: 以达则错为例. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 98-102. [QIAO C, LUO J C, SHENG Y W, et al. Analysis on lake change since ancient and modern ages using remote sensing in Dagze Co, Tibetan Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 98-102.]
- [10] ZHANG G Q, XIE H J, KANG S, et al. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009). *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(7): 1733-1742.
- [11] 李治国. 近 50 年气候变化背景下青藏高原冰川和湖泊变化. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1431-1443. [LI Z G. Glaciers and lakes changes on the Qinghai-Tibet Plateau under climate change in the past 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1431-1443.]
- [12] WANG X, GONG P, ZHAO Y, et al. Water-level changes in China's large lakes determined from ICESat/GLAS data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132(1): 131-144.
- [13] 董斯扬, 薛嫻, 尤全刚, 等. 近 40 年青藏高原湖泊面积变化遥感分析. *湖泊科学*, 2014, 26(4): 535-544. [DONG S Y, XUE X, YOU Q G, et al. Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(4): 535-544.]
- [14] 闫立娟, 齐文. 青藏高原湖泊遥感信息提取及湖面动态变化趋势研究. *地球学报*, 2012, 33(1): 65-74. [YAN L J, QI W. Lakes in Tibetan Plateau extraction from remote sensing and their dynamic changes. *Acta Geoscientia Sinica*, 2012, 33(1): 65-74.]
- [15] 张国庆, 谢红接, 姚檀栋, 等. 基于 ICESat 和 Landsat 的中国十大湖泊水量平衡估算. *科学通报*, 2013, 58(26): 2664-2678. [ZHANG G Q, XIE H J, YAO T D. et al. Water balance estimates of ten greatest lakes in China using ICESat and Landsat data. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(26): 2664-2678.]
- [16] 施雅风, 张祥松. 气候变化对西北干旱区地表水资源的影响和未来趋势. *中国科学: B 辑*, 1995, 25(9): 968-977. [SHI Y F, ZHANG X S. Impacts and future prospective of climate change to terrestrial water resource in arid regions of Northwest China. *Science China: Series B*, 1995, 25(9): 968-977.]
- [17] 李林, 吴素霞, 朱西德, 等. 21 世纪以来黄河源区高原湖泊群对气候变化的响应. *自然资源学报*, 2008, 23(2): 245-253. [LI L, WU S X, ZHU X D, et al. Response of the plateau lakes to changes of climate and frozen earth environment in the headwaters of the Yellow River since the 21st century. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(2): 245-253.]
- [18] CAI Y, KE C Q, DUAN Z. Monitoring ice variations in Qinghai Lake from 1979 to 2016 using passive microwave remote sensing data. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 120-131.
- [19] 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. *科学通报*, 2010, 55(18): 1789-1798. [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. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(18): 1789-1798.]
- [20] 李华朋, 张树清, 孙妍. 合成孔径雷达在湿地资源研究中的应用. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 148-154. [LI H P, ZHANG S Q, SUN Y. The applications of SAR to wetlands resource research. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1): 148-154.]
- [21] 陈军, 柯长青, 汪永丰. 南极拉森北部冰架表面物质损失机制探讨. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1117-1125. [CHEN

- J, KE C Q, WANG Y F. Study on the surface mass loss mechanism of the northern Larsen ice shelf. *China Environmental Science*, 2018, 38(3): 1117-1125.]
- [22] SILVA J S D, CALMANT S, SEYLER F, et al. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2160-2181.
- [23] YUJI M, YUSUKE I, KIYOSHI T, et al. Development of highly accurate global polygonal drainage basin data. *Hydrological Processes*, 2009, 23(4): 572-584.
- [24] 张鑫, 吴艳红, 张鑫. 1972-2012年青藏高原中南部内陆湖泊的水位变化. *地理学报*, 2014, 69(7): 993-1001. [ZHANG X, WU Y H, ZHANG X. Water level variation of inland lakes on the south-central Tibetan Plateau in 1972-2012. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 993-1001.]
- [25] TUCKER C J, DYKSTRA J D, GRANT D M. NASA's global orthorectified landsat data set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70: 313-322.
- [26] CHANDER G, MARKHAM B L, HELDER D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 893-903.
- [27] HE T, LIANG S, WANG D, et al. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+, and OLI data based on the unified direct estimation approach. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204(2018): 181-196.
- [28] 陈军. 基于多源遥感数据的拉森冰架形态演变及表面流速估算研究. 南京: 南京大学, 2016. [CHEN J. Study on morphology evolution and surface velocity estimations of Larsen ice shelf using multi-source remote sensing data. Nanjing University, 2016.]
- [29] CRÉTAUX J F, JELINSKI W, CALMANT S, et al. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in Space Research*, 2011, 47(9): 1497-1507.
- [30] DUAN Z, BASTIAANSEN W G M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 34(5): 403-416.
- [31] 赵云, 廖静娟, 沈国状, 等. 卫星测高数据监测青海湖水位变化. *遥感学报*, 2017, 21(4): 633-644. [ZHAO Y, LIAO J J, SHEN G Z, et al. Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 633-644.]
- [32] MEDINA C E, GOMEZ-ENRI J, ALONSO J J, et al. Water level fluctuations derived from ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and in-situ, measurements in a subtropical water body: Lake Izabal (Guatemala). *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3604-3617.
- [33] FRAPPART F, CALMANT S, CAUHOPÉ M, et al. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon Basin. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(2): 252-264.
- [34] ZHENG J J, KE C Q, SHAO Z D, et al. Monitoring changes in the water volume of Hulun Lake by integrating satellite altimetry data and Landsat images between 1992 and 2010. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(1): 016029.
- [35] LEE H, SHUM C K, TSENG K H, et al. Elevation changes of Bering Glacier System, Alaska, from 1992 to 2010, observed by satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132(10): 40-48.
- [36] 刘英, 岳辉, 王浩人, 等. 2016. 基于LEGOS HYDROWEB的青藏高原湖泊群水位和面积动态变化分析. *科学技术与工程*, 16(30): 169-175. [LIU Y, YUE H, WANG H R, et al. Dynamic analysis of water level and area of Qinghai-Tibet Plateau group lakes based on LEGOS HYDROWEB. *Science Technology & Engineering*, 2016, 16(30): 169-175.]
- [37] 王松涛, 金晓娟, 高萌萌, 等. 阿牙克库木湖动态变化及其对冰川消融的响应. *人民黄河*, 2016, 38(7): 64-67. [WANG S T, JIN X M, GAO M M, et al. Dynamic change of Ayakekumu Lake and its response to glaciers melting. *Yellow River*, 2016, 38(7): 64-67.]
- [38] RAUP B, RACOVITEANU A, KHALSA S J S, et al. The GLIMS geospatial glacier database: A new tool for studying glacier change. *Global & Planetary Change*, 2007, 56(1): 101-110.
- [39] KROPÁČEK, J, MAUSSION, F, CHEN, F, et al. Analysis of ice phenology of lakes on the Tibetan Plateau from MODIS data. *Cryosphere*, 2013, 7(1): 287-301.
- [40] LIAO J J, SHEN G Z, LI Y K. Lake variations in response to climate change in the Tibetan Plateau in the past 40 years. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(6): 534-549.

- [41] 祝合勇, 杨太保, 田洪阵. 1973-2010年阿尔金山冰川变化. 地理研究, 2013, 32(8): 1430-1438. [ZHU H Y, YANG T B, TIAN H Z. Glacier variation in the Altun Mountains from 1973 to 2010. Geographical Research, 2013, 32(8): 1430-1438.]
- [42] 苏宏超, 魏文寿, 韩萍. 新疆近50 a来的气温和蒸发变化. 冰川冻土, 2003, 25(2): 174-178. [SU H C, WEI W T, HAN P. Changes in air temperature and evaporation in Xinjiang during recent 50 years. Journal of Glaciology & Geocryology, 2003, 25(2): 174-178.]
- [43] 秦伯强. 气候变化对内陆湖泊影响分析. 地理科学, 1993, 13(3): 212-219. [QIN B Q. Analysis of the influence of climatic change on inland lakes. Scientia Geographica Sinica, 1993, 13(3): 212-219.]
- [44] 范云崎. 西藏内陆湖泊补给系数的初步探讨. 海洋与湖沼, 1983, 14(2): 117-127. [FAN Y Q. The supply coefficient of the interior lakes in Xizang. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1983, 14(2): 117-127.]
- [45] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近30年气候变化趋势. 地理学报, 2005, 60(1): 3-11. [WU S H, YIN Y H, ZHENG D, et al. Climate changes in Tibetan Plateau during the last three decades. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(1): 3-11.]
- [46] 林振耀, 赵昕奕. 青藏高原气温降水变化的空间特征. 中国科学: D辑, 1996, 26(4): 354-358. [LIN Z Y, ZHAO X Y. Spatial characters of temperature and precipitation in the Tibetan Plateau. Science in China: Ser. D, 1996, 26(4): 354-358.]
- [47] 魏善蓉, 金晓媚, 王凯霖, 等. 基于遥感的柴达木盆地湖泊面积变化与气候响应分析. 地学前缘, 2017, 24(5): 427-433. [WEI S R, JIN X M, WANG K L, et al. Response of lake area variation to climate change in Qaidam Basin based on remote sensing. Earth Science Frontiers, 2017, 24(5): 427-433.]
- [48] 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(5): 510-518. [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. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 510-518.]
- [49] 孟恺, 石许华, 王二七, 等. 青藏高原中部色林错湖近10年来湖面急剧上涨与冰川消融. 科学通报, 2012, 57(7): 571-579. [MENG K, SHI X H, WANG E Q, et al. High-altitude salt lake elevation changes and glacial ablation in Central Tibet, 2000-2010. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(7): 571-579.]
- [50] LEE H, SHUM C K, TSENG K H, et al. Present-day lake level variation from envisat altimetry over the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: Links with precipitation and temperature. Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences, 2011, 22(2): 169-175.
- [51] CHENG G, WU T. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2007, 112(F2): 93-104.
- [52] 陈沈斌, 刘允芬, THOMAS A. 青藏高原20世纪后40年潜在蒸散趋势及其空间分布. 自然资源学报, 2008, 23(6): 990-1008. [CHEN S B, LIU Y F, THOMAS A. Potential evapotranspiration trends and its spatial distributions on the Tibetan Plateau from 1961 to 2000. Journal of Natural Resources, 2008, 23(6): 990-1008.]

## The changes in the water volume of Ayakekumu Lake based on satellite remote sensing data

CHEN Jun<sup>1,2</sup>, WANG Yong-feng<sup>1</sup>, ZHENG Jia-jia<sup>2</sup>, CAO Li-guo<sup>3</sup>

(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230000, China;

2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. School of

Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** A long time series of the Ayakekumu Lake level change has been compiled by combination of the T/P, RA-2 and Hydroweb data. In addition, we assessed changing index of the Ayakekumu Lake during 1995-2015 based on Landsat images. The results showed that, the Ayakekumu Lake area and level increased continuously during the observation period, the area of lake increased from 624 km<sup>2</sup> in 1995 to 995 km<sup>2</sup> in 2015, and water level increased by 5 m in total in the period of 1995-2015. Meanwhile, the air temperature had risen, and the area of glaciers retreated from 361.27 km<sup>2</sup> in 1994 to 345.26 km<sup>2</sup> in 2016. We concluded that the water volume change was related with climate factors, and the main factor was warm-wet climate. Additionally, atmosphere warming led to water level increase due to glaciers melting. The water volume changing in Ayakekumu Lake could be affected by the increasing precipitation as well as dropping evaporation. Some factors are likely to affect lake expansion, including permafrost melting and precipitation at high altitudes. In sum, accurate measurements of lake ice and water levels are critical for understanding the water resource balance and hydrologic cycle in arid or semi-arid regions of China.

**Keywords:** Ayakekumu Lake; radar altimetry; lake extent; water level; climate change