

1986—2015年青藏高原哈拉湖湖泊动态对气候变化的响应

李东昇¹, 张仁勇², 崔步礼¹, 赵云朵³, 王莹¹, 姜宝福¹

(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025; 2. 烟台市土地储备中心, 烟台 264003;

3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 湖泊是气候变化的敏感指示器, 研究其动态变化对揭示全球气候变化具有重要意义。以哈拉湖流域为研究区, 基于3S技术提取流域内湖泊面积、形状等信息, 揭示近30年哈拉湖流域湖泊动态变化特征, 并探讨其对气候变化的响应。结果表明: 1986—2015年间, 哈拉湖流域湖泊面积变化呈“V”型, 其动态变化大致可分为两个阶段: 波动下降阶段(1986—2001年)和波动上升阶段(2001—2015年)。其中1986—2001年湖泊面积由593.68 km²减少到584.83 km²(减少8.85 km²); 2001—2015年由584.83 km²增加到614.31 km²(增加29.48 km²)。对湖泊面积变化量与冰川面积变化量及同期遥感数据阶段各气候要素相关分析发现, 湖泊面积变化量与阶段降水量呈正相关, 且相关显著性水平在0.01以上, 进而降水量是湖泊动态变化的主导因素。

关键词: 湖泊动态; 冰川动态; 气候变化; 哈拉湖; 青藏高原

湖泊在地球水体中仅占0.4%, 却是全球水文系统的重要组成部分, 在自然界的水文循环中发挥着重要的作用, 与大气圈进行热量和水分交换^[1-3]。湖泊亦是气候环境变化的指示器, 其对气候变化反应迅速, 且反映了区域甚至大规模大气环流内冰冻圈、水圈、生物圈和大气圈的综合信号^[4-8]。因此, 研究其动态变化对于揭示全球气候变化与区域水文循环响应具有重要意义。青藏高原被称为世界“第三极”, 气候寒冷, 冰川面积广, 是我国乃至亚洲诸多河流的发源地, 素有“亚洲水塔”之称^[9,10]。青藏高原上有大量的高山内陆湖泊, 这些湖泊受人类活动影响较小, 对气候变化极为敏感, 成为探索水文过程、评估水资源和了解气候变化的重要指标^[11,12]。冰川湖泊更备受关注, 气温升高引起冰川融水的增加是冰川湖泊面积和水位变化的重要影响因素^[13]。同时, 近年来青藏高原上大量湖泊出现湖泊水位上升、湖泊面积增大, 从而导致草场淹没, 对生态环境及农牧民生活产生了严重的影响^[14]。因此研究湖泊面积变化及其对气候变化的响应, 有助于揭示全球变化机理及其未来趋势, 对区域水资源调控亦有指导借鉴意义。

哈拉湖位于青藏高原东北部, 是一个封闭式的内流湖, 平均海拔超过5500 m, 湖水主要来源于湖面降水和周边山区冰川融水^[15]。流域的封闭性及人类活动极弱致使流域内湖泊水体面积对气候变化极其敏感, 使得该湖泊成为研究水文过程对气候变化响应的理想区域。目前已开展的相关研究主要集中在利用湖泊沉积物开展古气候及环境变化研究

收稿日期: 2019-05-24; 修订日期: 2019-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877157, 41730854); 地表过程与资源生态国家重点实验室开放基金(2017-KF-15)

作者简介: 李东昇(1995-), 男, 山东青岛人, 硕士, 研究方向为水文水资源。E-mail: dongshengli7@163.com

通讯作者: 崔步礼(1981-), 男, 山东东营人, 博士, 副教授, 研究方向为水资源与同位素水文学。

E-mail: cuibuli@163.com

方面。例如马雪洋等^[16]通过高分辨率XRF岩芯扫描分析沉积岩芯地球化学元素变化从而获得水文状况。曹洁等^[17]利用放射性核素²¹⁰Pb和¹³⁷Cs测年资料揭示了哈拉湖地区近800年来的气候环境演化过程。尽管针对哈拉湖流域湖泊面积变化及其对冰川和气候的响应已有相关学者进行了研究,例如吴红波等^[18]基于2000—2015年星载雷达测高资料和Landsat卫星多光谱遥感资料揭示了冰川亏损对流域湖泊水位波动的影响,但此类研究仍相对较少。

鉴于此,本文选取哈拉湖作为研究区,基于1986—2015年间的遥感影像数据和周围气象站点的气象数据,通过3S技术提取湖泊面积、形状等信息,揭示湖泊多年动态变化规律,探讨湖泊对冰川及气候变化的响应机制,为预测未来湖泊变化趋势提供基础,并为区域水资源的合理利用与开发提供指导借鉴。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

哈拉湖流域位于青藏高原东北部,疏勒南山以南,祁连山脉西段,哈尔科山以北,系完整的封闭式湖泊流域(图1)。地理位置介于38°~39°N、97°~98°E之间,海拔在3893~5800 m之间,流域面积4763 km²^[15,18]。哈拉湖为咸水湖,湖水pH值约为8.8,水体中阳离子含量Na⁺>Mg²⁺>K⁺>Ca²⁺,阴离子含量Cl⁻>SO₄²⁻>HCO₃⁻>CO₃²⁻^[16]。哈拉湖流域属温带大陆性气候,年均气温-5.9℃;年降水量250~300 mm,季节变化大,降水主要集中在5-9月^[19];年日照时数≥2800 h;年均湿度≥40%;年平均风速≥1.7 m/s。入湖河流20余条,水系呈向心状,多为季节性河流,补给源为高山冰雪融水和降水,流程短、流量小、流量季节变化大^[19]。

1.2 数据来源

本文采用的数据主要有:(1)1986—2015年间30个时间点的60景(哈拉湖流域覆盖2景范围)Landsat遥感影像(表1),影像下载于美国地质调查局网站(<http://glovis.usgs.gov/>)。(2)哈拉湖流域气象数据采用距离研究区最近的托勒气象站日值数据,托勒气象站位于98°25'E、38°48'N,海拔3368.3 m,距研究区60 km(图1),数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。

1.3 研究方法

针对湖泊边界信息提取,本文采用波段比值法进行自动提取,同时通过目视解译订正和消除湖泊边界的提取误差。相关操作在ENVI 5.0、ArcGIS 9.3和ArcView 3.2等软件支持下完成。对于探究湖泊动态对气候变化的响应,两景影像时间点之间的气候要素数据相比于影像所在年份的气候要素数据更具有代表性。因此,本文获取与遥感数据同期

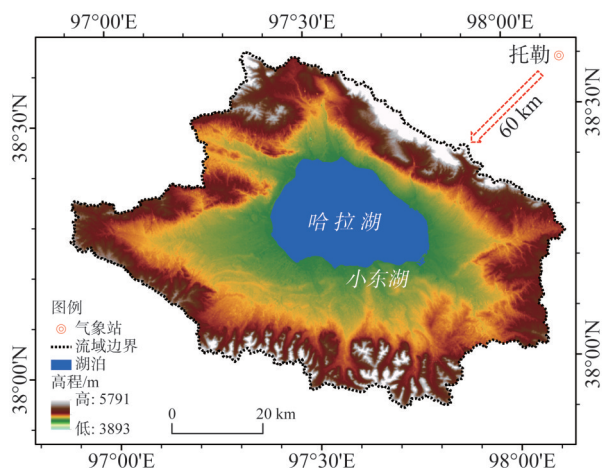


图1 哈拉湖流域地理位置

Fig. 1 Location of the Hala Lake Basin

表1 遥感影像数据列表
Table 1 List of images in this research

序号	日期	行列号	卫星	传感器	分辨率/m	成像周期/天
1	1986.07.25	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
2	1987.09.14	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
3	1988.06.28	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
4	1989.08.02	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
5	1990.08.21	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
6	1991.09.25	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
7	1992.10.29	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
8	1993.04.07	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
9	1994.09.17	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
10	1995.08.19	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
11	1996.09.22	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
12	1997.09.25	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
13	1998.09.28	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
14	1999.09.15	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
15	2000.07.15	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
16	2001.04.01	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
17	2002.08.22	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
18	2003.09.10	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
19	2004.08.27	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
20	2005.05.10	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
21	2006.08.01	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
22	2007.06.01	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
23	2008.08.22	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
24	2009.08.09	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
25	2010.07.27	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
26	2011.10.02	P135/R33、P135/R34	Landsat 5	TM	30	16
27	2012.08.25	P135/R33、P135/R34	Landsat 7	TM	30	16
28	2013.07.19	P135/R33、P135/R34	Landsat 8	OLI	30	16
29	2014.09.08	P135/R33、P135/R34	Landsat 8	OLI	30	16
30	2015.08.10	P135/R33、P135/R34	Landsat 8	OLI	30	16

阶段各气候要素数据，并基于相关分析法揭示湖泊动态对冰川及气候变化的响应关系，相关操作在SPSS 13.0软件支持下完成。

2 结果分析

2.1 哈拉湖流域湖泊面积变化特征

1986—2015年间，哈拉湖流域内湖泊面积总体呈现上升趋势，由1986年的593.68 km²到2015年的614.31 km²，变化过程大致可分为二个阶段（图2），分别为减少阶段（1986—2001年）和增加阶段（2001—2015年）。其中1986—2001年由593.68 km²减少到

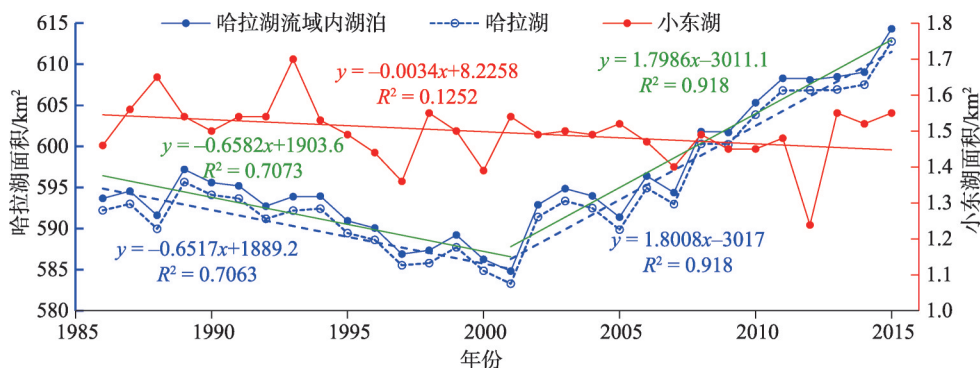


图2 哈拉湖流域内湖泊总面积、哈拉湖面积及小东湖面年际变化

Fig. 2 Annual changes of the total area of Hala Lake and lake area of Hala Lake and Xiaodong Lake

584.83 km², 减少了8.85 km², 平均每年减少0.66 km²; 2001—2015年由584.83 km²增加到614.31 km², 增加了29.48 km², 平均每年增加1.80 km²。同期青海湖面积变化过程亦大致可分为两个阶段, 分别为减少阶段(1995—2004年)和增加阶段(2004—2015年)。其中1995—2004年由4343.21 km²减少到4250.50 km²; 2004—2015年由4250.50 km²增加到4389.36 km² [20,21]。

流域内共分为两个湖泊: 哈拉湖和小东湖(图1), 进一步对两个湖泊面积进行统计分析(图2)。哈拉湖的面积变化与流域内湖泊总面积变化趋势一致, 大致可分为两个阶段, 分别为减少阶段(1986—2001年)和增加阶段(2001—2015年)。其中1986—2001年由592.22 km²减少到583.29 km², 平均每年减少0.65 km²; 2001—2015年由583.29 km²增加到612.76 km², 平均每年增加1.80 km²。而小东湖在1986—2015年间总体呈现波动减少的趋势, 平均每年减少0.003 km²。

2.2 哈拉湖流域冰川面积变化特征

1986—2015年间, 哈拉湖流域内冰川面积呈波动减少趋势(图3f), 由1986年的106.24 km²减少到2015年的78.84 km², 共减少27.4 km²(占1986年冰川面积的25.79%), 平均每年减少0.94 km²。变化过程可分为两个阶段, 分别为快速消融阶段(1986—1997年)和缓慢消融阶段(1997—2015年), 两阶段的消融率分别为2.34 km²/a和0.58 km²/a。

2.3 哈拉湖流域气候变化特征

1986—2015年哈拉湖流域年平均气温呈波动上升趋势(图3a), 由-2.82 °C上升至-1.39 °C, 平均每年上升0.04 °C/a, 与德令哈多年的平均气温上升速率相一致 [22], 该速率高于青藏高原多年的平均气温上升速率0.02 °C/a [23], 并略高于青海湖和河西走廊多年的平均气温上升速率0.03 °C [24,25]。

哈拉湖流域年降水量在1986—2015年间呈波动增加趋势(图3b), 由304.9 mm增加到388.5 mm, 平均每年增加3.15 mm/a, 高于青藏高原(0.62 mm/a [26])、德令哈(1.95 mm/a [27])、河西走廊(0.63 mm/a [28])及青海湖(0.44 mm/a [29])等区域的多年平均降水增长速率。变化过程大致分为波动减少阶段(1986—1997年)和波动增加阶段(1997—2015年)。

1986—2015年哈拉湖流域相对湿度呈波动减少趋势(图3c), 平均每年减少-0.006%/a,

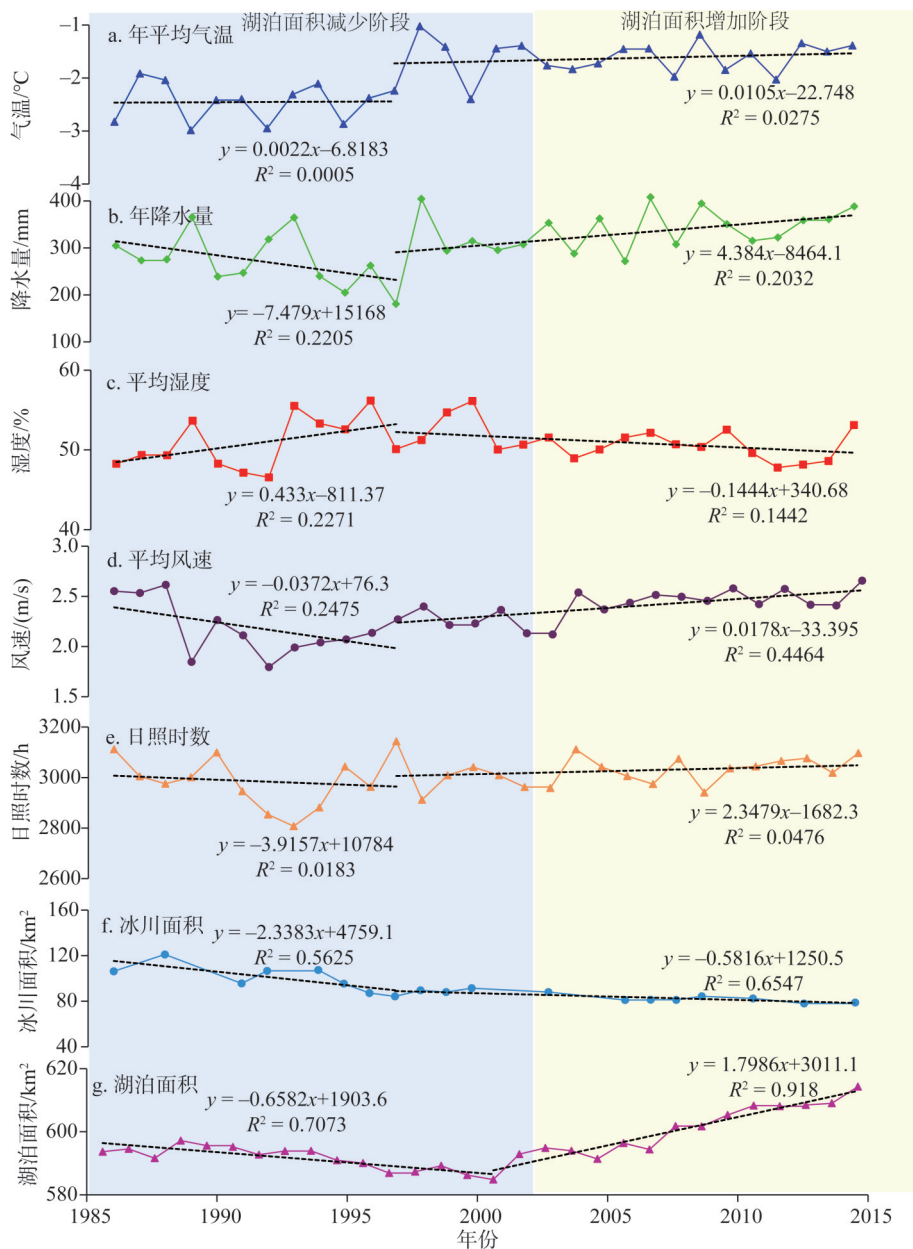


图3 哈拉湖流域内湖泊总面积、冰川面积及气象要素年际变化

Fig. 3 Variations of meteorological elements, lake area and glacier area in Hala Lake Basin during the period from 1986 to 2015

与青藏高原 ($0.0099\%/a^{[30]}$) 呈相反的变化趋势, 变化过程大致分为波动增加 (1986—1997年) 和波动减少阶段 (1997—2015年); 平均风速、日照时数均呈波动上升趋势 (图 3d、图 3e), 平均每年分别增加 0.012 m/s/a 、 2.53 h/a , 变化过程大致分为波动减少 (1986—1997年) 和波动增加阶段 (1997—2015年), 其中日照时数与青藏高原 ($0.07\sim 10.67\text{ h/a}^{[31]}$) 大致相符, 而平均风速与青藏高原 ($-0.077\text{ m/s/a}^{[32]}$) 呈相反的变化趋势。

2.4 湖泊动态变化对冰川及气候变化的响应

对于封闭式湖泊流域, 湖泊水量平衡直接受控于气候因子和冰川消融, 降水多、蒸

发少、冰川融水多，将导致水量增加，反之亦然^[33-36]。同时湖泊面积的变化直接反映了湖泊水量收支盈亏。冰川主要受控于气温^[37]，而研究时段内气温不断上升，冰川持续消融^[38]。图3显示，哈拉湖流域内气温、降水、风速、日照时数均呈波动上升趋势，与湖泊面积变化趋势相同，在研究时段内均呈“V”型变化趋势；冰川面积、湿度与湖泊面积变化趋势相反。通过对湖泊面积变化量与同期遥感数据阶段的各气候要素数据对比分析发现（表2、图4），湖泊面积变化量与阶段降水量、平均气温、平均湿度、平均风速、日照时数的波动趋势及周期相一致，阶段降水量、平均气温、平均湿度、平均风速、日照时数的低值对应着湖泊面积变化量的低值（2、7、15、19、27；图4中的红线）；阶段降水量、平均气温、平均湿度、平均风速、日照时数、干燥的高值对应着湖泊面积变化量的高值（3、8、16、22、25；图4中的紫线）。

表2 湖泊与冰川面积变化量
Table 2 Change in the area of lakes and glaciers

阶段	时间周期	年数/a	湖泊面积变化量/km ²	冰川面积变化量/km ²
1	1986.07.25-1987.09.14	1.14	0.88	14.76
2	1987.09.14-1988.06.28	0.79	-2.94	
3	1988.06.28-1989.08.02	1.10	5.58	-25.38
4	1989.08.02-1990.08.21	1.05	-1.60	
5	1990.08.21-1991.09.25	1.10	-0.40	
6	1991.09.25-1992.10.29	1.10	-2.47	10.99
7	1992.10.29-1993.04.07	0.44	1.16	0.74
8	1993.04.07-1994.09.17	1.45	0.06	
9	1994.09.17-1995.08.19	0.92	-3.01	-11.92
10	1995.08.19-1996.09.22	1.10	-0.87	-8.26
11	1996.09.22-1997.09.25	1.01	-3.17	-2.95
12	1997.09.25-1998.09.28	1.01	0.45	5.36
13	1998.09.28-1999.09.15	0.96	1.87	-1.54
14	1999.09.15-2000.07.15	0.83	-2.96	3.40
15	2000.07.15-2001.04.01	0.71	-1.43	-3.42
16	2001.04.01-2002.08.22	1.39	8.07	
17	2002.08.22-2003.09.10	1.05	1.96	
18	2003.09.10-2004.08.27	0.96	-0.88	-7.03
19	2004.08.27-2005.05.10	0.70	-2.59	
20	2005.05.10-2006.08.01	1.23	5.01	
21	2006.08.01-2007.06.01	0.83	-2.02	0.30
22	2007.06.01-2008.08.22	1.23	7.42	-0.17
23	2008.08.22-2009.08.09	0.96	-0.10	3.20
24	2009.08.09-2010.07.27	0.96	3.62	-1.91
25	2010.07.27-2011.10.02	1.18	2.97	
26	2011.10.02-2012.08.25	0.90	-0.20	-4.44
27	2012.08.25-2013.07.19	0.90	0.39	
28	2013.07.19-2014.09.08	1.14	0.56	0.86
29	2014.09.08-2015.08.10	0.92	5.27	

湖泊面积变化量与同期遥感数据阶段的各气候要素数据相关分析结果表明(表3), 哈拉湖流域内湖泊面积变化量与阶段降水量、平均气温、平均湿度、平均风速、日照时数均呈正相关, 其中与降水量相关性最强, 显著性水平在0.01以上; 与阶段气温和日照时数的相关性次之, 显著性水平在0.05以上; 与阶段湿度、风速的相关性不显著。湖泊面积变化量与冰川面积变化量呈负相关, 相关性不显著。哈拉湖流域降水量主要集中在暖季, 呈上升趋势; 且冷季降水量少, 呈下降趋势; 哈拉湖流域降水量主要以降雨形式对湖泊进行了补给, 使得湖泊面积变化与降水量呈显著性相关。温度上升会加剧冰川的消融^[39], 通过冰川面积变化量与同期遥感数据阶段的各气候要素数据及湖泊面积变化量

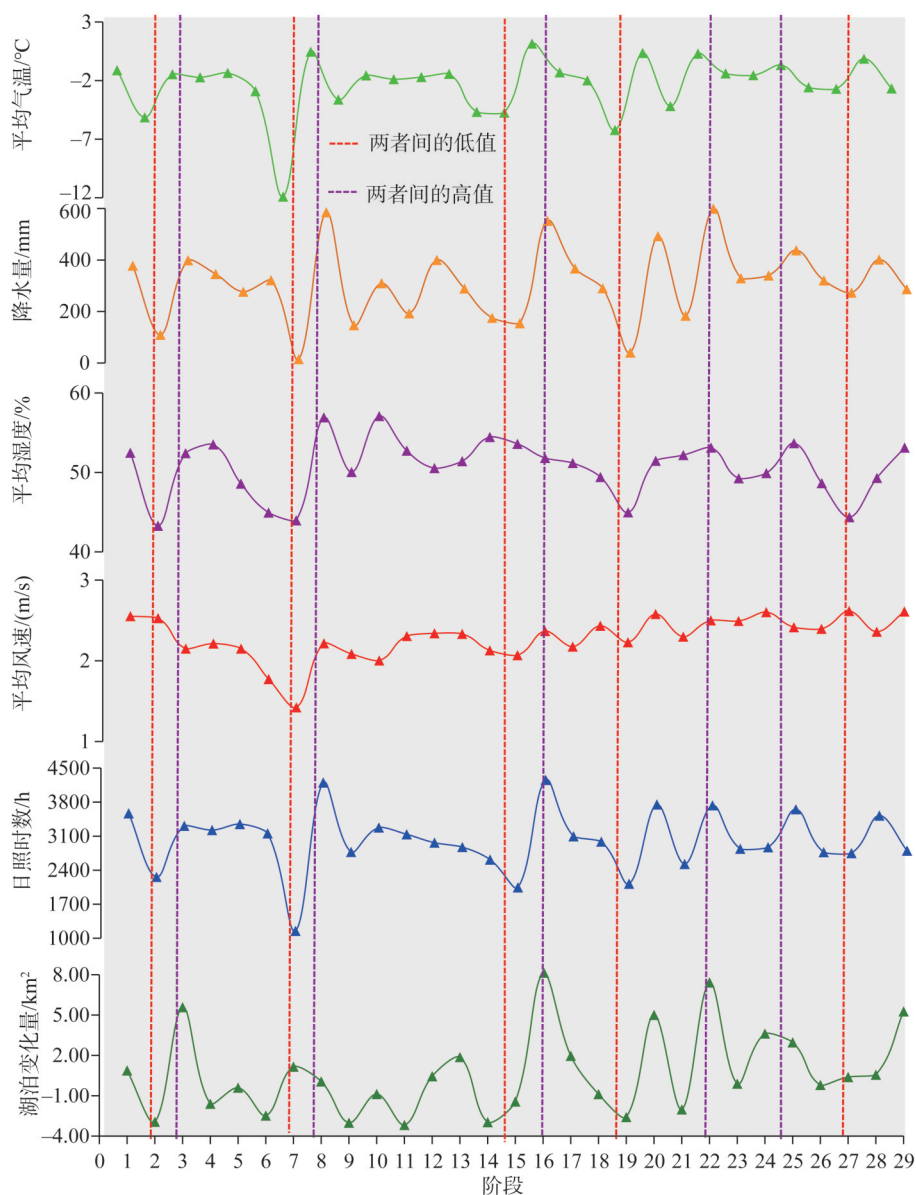


图4 湖泊面积变化量与同期遥感数据阶段的各气候要素

Fig. 4 The change of lake area and the climatic factors of remote sensing data in the same period

表3 湖泊面积变化量与同期遥感数据阶段的各气候要素相关系数

Table 3 Table of the relationship between the change of lake area and the climatic elements in the corresponding remote sensing data stage

	气温	降水	湿度	风速	日照时数	干燥度	湖泊面积阶段 变化量	冰川面积阶段 变化量
气温	1							-0.182
降水	0.867**	1						-0.363
湿度	0.521**	0.491**	1					-0.329
风速	0.588**	0.402*	0.119	1				0.098
日照时数	0.929**	0.898**	0.534**	0.399*	1			-0.430
湖泊面积变化量	0.45*	0.668**	0.23	0.329	0.463*	0.084	1	-0.221

注：“”、“*”分别表示显著水平在0.01、0.05以上。

的相关性分析发现（表3），冰川面积变化量与阶段气温、降水、湿度、日照时数呈负相关，相关性不显著；与风速变化量呈正相关，相关性亦不显著；加之冰川面积变化量与湖泊面积变化量呈负相关，进而可以猜测冰川对气温、降水、湿度、日照时数等气候要素具有响应并通过冰川融水的形式对湖泊产生补给。

1970—2010年青藏高原北部湖泊呈现“扩张—萎缩—扩张”的趋势；西部湖泊呈现快速扩张的趋势，其中2000—2010年间湖泊扩张最为明显^[40]。高原湖泊对气候变化的响应具有区域性，湖泊对气候变化的敏感性受海拔和湖泊面积大小的影响，一般而言，高海拔地区湖泊对温度更加敏感，小湖泊对温度和降水更敏感，季节性冻土地区的冻土融水是导致湖泊季节性收缩的原因^[41]。近年来，气温升高，冰川消融，永冻层融化，冰川湖泊受冰川融水及冻土融水的补给作用而急剧扩张^[42-45]。哈拉湖为冰川湖泊，其在1986—2015年间呈现先萎缩后扩张的“V”型变化趋势，与青藏高原北部湖泊整体变化趋势一致^[46]。其中，1986—2001年湖泊面积呈下降趋势，1986—1997年间，降水量的持续下降导致降水对湖泊的补给相对较少，进而使得湖泊面积日益萎缩；1998—2001年间，尽管流域降水量开始呈现上升趋势，但温度出现短暂下降，冰川稳定且有少量积累，冰川融水对湖泊的补给减少，使得湖泊面积仍然呈现下降趋势。本文中出现的1998年气候由寒冷干旱向温暖湿润转变的临界点与青藏高原整体的气候变化相一致^[41]。2001年以后，湖泊面积开始呈上升趋势，其原因与2001年以后温度上升，冰川消融，冰川融水及降水对湖泊的补给量增加密不可分。哈拉湖与最近的青海湖相比，湖面扩张早于青海湖三年，其原因可能与冰川对气候变化的响应有关，在冰川融水的补给作用之下，湖泊面积扩张早于青海湖。综上，哈拉湖湖泊面积变化主要受降水量、冰川融水的影响，通过相关分析结果表明，降水量是湖泊面积呈“V”型变化的主导因子。哈拉湖对降水的敏感性同青藏高原大部分湖泊具有一致性^[41]，如鄂陵湖^[47]以及羊卓克盆地^[41]。在全球气温持续升高的背景之下，流域内的冰川将持续消融，进而湖泊面积在未来几年中将持续增加，但当冰川完全消融，湖泊面积可能继续增加，也可能减小。根据GCM预测，中国的21世纪中后期将面临广泛的干旱化，干旱频次和持续时间均将上升^[48]，因此冰川完全消融后，湖泊面积减小的概率较大。与此同时，冰湖溃决洪水（GLOFS）是冰湖溃决灾害的主要原因，冰川的持续消融，加剧了这种潜在的风险^[42,49]。因此系统地研究冰川与气候变化对湖泊面积影响的贡献率以及湖泊—冰川—气候变化之间相互影响的

贡献率,将有利于进一步揭示区域水文对气候变化的响应,对区域水文未来变化趋势的预测具有重要意义。

3 结论

本文基于哈拉湖流域多年 Landsat 遥感影像提取了哈拉湖流域湖泊面积、形状等信息,在湖泊面积方面分析了哈拉湖流域近 30 年湖泊动态变化特征,探讨了湖泊面积变化对气候的响应,揭示了哈拉湖流域湖泊动态变化的主要驱动因素。

(1) 1986—2015 年间,哈拉湖流域湖泊面积呈“V”型变化趋势,大致分为两个阶段:波动下降阶段(1986—2001 年)和波动上升阶段(2001—2015 年)。其中 1986—2001 年湖泊面积由 593.68 km²减少到 584.83 km²(减少了 8.85 km²);2001—2015 年由 584.83 km²增加到 614.31 km²(增加了 29.48 km²)。

(2) 哈拉湖流域湖泊面积变化量与阶段降水、气温、风速、日照时数均呈正相关,湖泊面积变化量、降水、气温、风速、日照时数与冰川面积变化量呈负相关;因降水量与湖泊面积变化量的相关显著性水平在 0.01 以上,进而降水量是湖泊动态变化的主导因素。

参考文献(References):

- [1] LIU J S, WANG S Y, YU S M, et al. Climate warming and growth of high-elevation inland lakes on the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 2009, 67(3/4): 209-217.
- [2] 闫立娟, 郑绵平. 我国蒙新地区近 40 年来湖泊动态变化与气候耦合. *地球学报*, 2014, 35(4): 463-472. [YAN L J, ZHENG M P. Dynamic changes of lakes in Inner Mongolia-Xinjiang region and the climate interaction in the past forty years. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(4): 463-472.]
- [3] ZHANG Z X, CHANG J, XU C Y, et al. The response of lake area and vegetation cover variations to climate change over the Qinghai-Tibetateu during the past 30 years. *Science of the Total Environment*, 2018, 635(2018): 443-451.
- [4] ZHENG M P, ZHAO Y Y, LIU J Y. Palaeoclimatic indicators of China's Quaternary saline lake sediments and hydrochemistry. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(2): 259-265.
- [5] ADRIAN R C M, O'REILLY H, ZAGARESE S B, et al. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 2283-2297.
- [6] CRETAUX J F R, ABARCA-DEL-RIO M, BERGE-NGUYEN A, et al. Lakes volume monitoring from space. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37(2): 269-305.
- [7] TAO S J, FANG X, ZHAO S, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of American*, 2015, 112(7): 2281-2286.
- [8] ZHANG G Q, LI J L, ZHENG G X. Lake-area mapping in the Tibetan Plateau: An evaluation of data and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(3): 742-772.
- [9] QIU J. China: The third pole. *Nature*, 2008, 454(7203): 393-396.
- [10] LI X D, LONG D, HUANG Q, 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. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1603-1627.
- [11] 闫立娟, 郑绵平, 魏乐军. 近 40 年来青藏高原湖泊变迁及其对气候变化的响应. *地学前缘*, 2016, 23(4): 310-323. [YAN L J, ZHENG M P, WEI L J. Change of the lakes in Tibetan Plateau and its response to climate in the past forty years. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4): 310-323.]
- [12] YANG K, YE B, ZHOU D. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau. *Climate Change*, 2011, 109: 517-534.

- [13] 李治国. 近50 a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. Glacier 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.]
- [14] YAO T D. Glacial fluctuations and its impacts on lakes in the Southern Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(20): 2071.
- [15] 伍光和, 刘潮海. 哈拉湖流域的冰川作用特征及水资源利用问题. 冰川冻土, 1979, (2): 27-32. [WU G H, LIU C H. Glacier effect characteristic and water resource utility problem in the drainage area of Hala Lake. Journal of Glaciology and Geocryology, 1979, (2): 27-32.]
- [16] 马雪洋, 陈豆, 阳亚平, 等. 哈拉湖岩芯XRF扫描元素统计分析及其环境意义. 盐湖研究, 2014, 22(4): 1-10. [MA X Y, CHEN D, YANG Y P, et al. Statistical analysis of XRF scanned elements and their environmental significance in Hala Lake, Qinghai, China. Journal of Salt Lake Research, 2014, 22(4): 1-10.]
- [17] 曹洁, 张家武, 张成君, 等. 青藏高原北缘哈拉湖近800年来湖泊沉积及其环境意义. 第四纪研究, 2007, 27(1): 100-107. [CAO J, ZHANG J W, ZHANG C J, et al. Environmental changes during the past 800 years recorded in lake sediments from Hala Lake on the Northern Tibetan Plateau. Quaternary Sciences, 2007, 27(1): 100-107.]
- [18] 吴红波, 杨萌, 杨春利, 等. 冰川亏损对哈拉湖流域湖泊水位波动的影响. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 13-20. [WU H B, YANG M, YANG C L, et al. Effect of glacier mass loss on water level fluctuation of lake in Hala Lake Basin. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(4): 13-20.]
- [19] 路远新, 吴阿迪. 青海省哈拉湖地区自然概况及植被类型. 中国草原, 1984, (2): 27-31. [LU Y X, WU A D. Natural situation and vegetation types of Lake Hala in Qinghai province. Grassland of China, 1984, (2): 27-31.]
- [20] 曾昔, 肖天贵, 假拉. 近20年青海湖的面积变化特征及其与周围气候变化的响应. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(4): 438-447. [ZENG X, XIAO T G, JIA L. Characteristics of area change of Qinghai Lake and its response to the climate change in the nearly 20 years. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2018, 33(4): 438-447.]
- [21] 李均力, 方晖, 包安明, 等. 近期亚洲中部高山地区湖泊变化的时空分析. 资源科学, 2011, 33(10): 1839-1846. [LI J L, FANG H, BAO A M, et al. Spatio-temporal analysis of recent changes of lake area and lake water level at high mountains in Central Asia. Resources Science, 2011, 33(10): 1839-1846.]
- [22] 马季方. 德令哈市近40年气候特征分析. 青海气象, 2014, (4): 1-5. [MA J F. Climatic characteristics of Delingha city in recent 40 years. Qinghai Weather, 2014, (4): 1-5.]
- [23] 吴成启, 唐登勇. 近50年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征. 水土保持研究, 2017, 24(6): 262-272. [WU C Q, TANG D Y. Change of temperature in the Tibetan Plateau in the context of global warming in recent 50 years. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 262-272.]
- [24] 李珊珊, 曹广超, 石平超. 1970—2012年青海湖流域冷暖季气温变化特征及突变分析. 青海师范大学学报: 自然科学版, 2014, (3): 60-65. [LI S S, CAO G C, SHI P C. Air temperature variation and mutation analysis of cold/warm season in Qinghai Lake watershed from 1970 to 2012. Journal of Qinghai Normal University: Natural Science, 2014, (3): 60-65.]
- [25] 杨晓玲, 丁文魁, 刘明春, 等. 河西走廊东部近50年气温变化特征及其对比分析. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8): 76-81. [YANG X L, DING W K, LIU M C, et al. Change characteristics of temperature in Eastern Hexi Corridor in recent 50 years. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(8): 76-81.]
- [26] 赵雪雁, 张钦, 王亚茹, 等. 近55 a来青藏高原东部气候演变特征. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1088-1096. [ZHAO X Y, ZHANG Q, WANG Y R, et al. Climate evolution characteristics of Eastern Tibetan Plateau for the last 55 years. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1088-1096.]
- [27] 刘泽纯, 刘振中, 王富葆. 关于珠穆朗玛峰、腾格里峰、祁连山团结峰附近第四纪冰川发展的比较. 地理学报, 1962, 28(1): 19-33. [LIU Z C, LIU Z Z, WANG F B. Comparing the vicinity of Mount Everest, Tengri, Qilian unity Quaternary glacial peak of development. Acta Geographica Sinica, 1962, 28(1): 19-33.]
- [28] 杨晓玲, 丁文魁, 郭利梅. 河西走廊东部的降水特征. 干旱区研究, 2010, 27(5): 663-668. [YANG X L, DING W K, GUO L M. Analysis on the basic characteristics of precipitation in the East Hexi Corridor. Arid Zone Research, 2010, 27(5): 663-668.]

- [29] 闫蓉, 郭守生, 安光辉, 等. 1961—2013年青海湖南部地区降水变化特征分析. 中国农学通报, 2015, 31(22): 248-255. [YAN R, GUO S S, AN G H, et al. Precipitation patterns during 1961-2013 in the area of Southern Qinghai Lake. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(22): 248-255.]
- [30] 纪迪. 青藏高原气候变化及其NDVI的响应. 南京: 南京信息工程大学, 2012. [JI D. Climate change and its influence on NDVI over the Qinghai-Tibet Plateau. Nanjing: Nanjing University of Information Science, 2012.]
- [31] 华维, 范广洲, 陈权亮, 等. 青藏高原年日照时数的年代际变化趋势. 长江流域资源与环境, 2009, 18(12): 1149-1155. [HUA W, FAN G Z, CHEN Q L, et al. Study of interdecadal variation of the annual sunshine duration over Tibetan Plateau. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(12): 1149-1155.]
- [32] 姚慧茹, 李栋梁. 1971—2012年青藏高原春季风速的年际变化及对气候变暖的响应. 气象学报, 2016, 74(1): 60-75. [YAO H R, LI D L. The interannual variation of wind speed in the Tibetan Plateau in spring and its response to global warming during 1971-2012. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(1): 60-75.]
- [33] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861. [MENG M, NI J, ZHANG Z G. Aridity index and its applications in geo-ecological study. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(6): 853-861.]
- [34] 王利平, 文明, 宋进喜, 等. 1961—2014年中国干燥度指数的时空变化研究. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1488-1498. [WANG L P, WEN M, SONG J X, et al. Spatial temporal variation of aridity index during 1961-2014 in China. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9): 1488-1498.]
- [35] 杜鹃, 杨太保, 何毅. 1990—2011年色林错流域湖泊—冰川变化对气候的响应. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 88-93. [DU J, YANG T B, HE Y. Glaciers and lakes changes and climate response in the Selin Co Basin from 1990 to 2011. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(12): 88-93.]
- [36] 魏善蓉, 金晓梅, 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.]
- [37] 王炎强, 赵军, 李忠勤, 等. 1977—2017年萨吾尔山冰川变化及其对气候变化的响应. 自然资源学报, 2019, 34(4): 802-814. [WANG Y Q, ZHAO J, LI Z Q, et al. Glacier changes in the Sawuer Mountain during 1977-2017 and their response to climate change. Journal of Natural Resource, 2019, 34(4): 802-814.]
- [38] LI D S, CUI B L, WANG Y, et al. Glacier extent changes and possible causes in the Hala Lake Basin of Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Mountain Science, 2019, 16(7): 1571-1583.
- [39] 杨建平, 丁永建, 叶柏生, 等. 长江源区小冬克玛底冰川区积雪消融特征及对气候的响应. 冰川冻土, 2007, 29(2): 258-264. [YANG J P, DING Y J, YE B S, et al. Snowmelt process on the Xiao Dongkemadi Glacier in the source region of the Yangtze River and its responses to meteorological factor. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(2): 258-264.]
- [40] 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.]
- [41] 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, 2018, 18(2): 477-487.
- [42] NIE Y, SHENG Y W, LIU Q, et al. A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. Remote Sensing of Environment, 2016, 189: 1-13.
- [43] CAO B, PAN B, WANG J, et al. Changes in the glacier extent and surface elevation along the Ningchan and Shuiguan river source, Eastern Qilian Mountains, China. Quaternary Research, 2014, 81(3): 531-537.
- [44] WANG H J, CHEN Y N, XUN S. Changes in daily climate extremes in the arid area of northwestern China. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112(1-2): 15-28.
- [45] YU G M, XU J Z, KANG S C, et al. Lead isotopic composition of insoluble particles from widespread mountain glaciers in Western China: Natural vs. anthropogenic sources. Atmospheric Environment, 2013, 75: 224-232.
- [46] JIANG L G, NIELSEN K, ANDERSEN O B, et al. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using

- Cryosat-2 SARIn mode data. *Journal of Hydrology*, 2017, 544: 109-124.
- [47] 李晖, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 近30年三江源地区湖泊变化图谱与面积变化. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 862-873. [LI H, XIAO P F, FENG X Z, et al. Lake changes in spatial evolution and area in source region of three rivers in recent 30 years. *Journal of Lake Science*, 2010, 22(6): 862-873.]
- [48] 莫兴国, 胡实, 卢洪健, 等. GCM预测情景下中国21世纪干旱演变趋势分析. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1244-1256. [MO X G, HU S, LU H J, et al. Drought trends over the terrestrial China in the 21st century in climate change scenarios with ensemble GCM projections. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7): 1244-1256.]
- [49] SONG C Q, SHENG Y W, WANG J D. Heterogeneous glacial lake changes and links of lake expansions to the rapid thinning of adjacent glacier termini in the Himalayas. *Geomorphology*, 2016, 280: 30-38.

Response of lake dynamics to climate change in the Hala Lake Basin of Tibetan Plateau from 1986 to 2015

LI Dong-sheng¹, ZHANG Ren-yong², CUI Bu-li¹, ZHAO Yun-duo³,
WANG Ying¹, JIANG Bao-fu¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China;

2. Yantai Land Reserve Center, Yantai 264003, Shandong, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Lakes are sensitive indicators of climate change, and studying their dynamics is important for revealing global climate change. This study selected the Hala Lake Basin in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau as a study area, and examined the relationships between the temporal and spatial changes of lake in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau and the climate change based on remote sensing imagery, climatological data, and topographic data from 1986 to 2015. Results showed that the lake area change presented a "V"-shaped pattern in the Hala Lake Basin during the study period. The dynamic change process can be divided into two stages: The stage of volatility decline (1986-2001) and the stage of volatility rise (2001-2015). The lake area decreased from 593.68 km² in 1986 to 584.83 km² in 2001 (with a reduction of 8.85 km²) and increased from 584.83 km² in 2001 to 614.31 km² in 2015 (with an increase of 29.48 km²). Correlation analysis between changes in lake and glacial areas and climatic factors in the same period of remote sensing data shows that the change of lake area is positively correlated with the stage precipitation, and the relevant significance level is above 0.01. The dominant factor of the dynamic change of lake is precipitation.

Keywords: lake dynamics; glacier dynamics; climate change; Hala Lake Basin; Qinghai-Tibet Plateau