

1974—2016 年青海湖水面面积变化遥感监测*

骆成凤¹, 许长军², 曹银璇¹, 童李霞¹

(1: 中国测绘科学研究院, 北京 100830)

(2: 青海省地理空间信息技术与应用重点实验室, 西宁 810001)

摘要: 位于青藏高原东北部的青海湖是我国最大的咸水湖和内陆湖, 也是青藏高原东北部的重要水汽源, 青海湖面积的动态变化是气候和周围生态环境状况的重要体现。本研究利用长时间序列中分辨率遥感影像数据, 通过人工提取湖岸水涯线信息对青海湖水面面积进行监测。结果显示: 1974—2016 年期间, 青海湖面积总体上呈先减后增的变化趋势。2004 年水面面积最小, 为 4223.73 km², 比 1974 年减少 253.80 km²。其中 1974—1987 年期间面积骤减; 2000—2009 年期间青海湖水面面积变化幅度相对较小, 平均变化幅度为 6.85 km²。2009—2016 年 7 a 间, 水面面积增加了 128.27 km²。2012 年青海湖面积骤增, 比 2011 年 8 月同期增加 65.12 km²; 同年 6 月和 9 月的面积变化为 2002—2016 年最大, 达到 59.18 km²。湖东岸沙岛的湖岸线变化最为显著, 1974—2004 年岸线后退最大距离达 4.59 km, 2012 年的年内最大变化距离为 0.39 km。青海湖流域内降水补给增加, 生态环境治理措施促使入湖河流径流量增大, 是近年来湖水面积增加的主要原因。

关键词: 青海湖; 水面面积; 遥感监测

Monitoring of water surface area in Lake Qinghai from 1974 to 2016

LUO Chengfeng¹, XU Changjun², CAO Yinxuan¹ & TONG Lixia¹

(1: Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, P.R.China)

(2: Geomatics Technology and Application Key Laboratory of Qinghai Province, Xining 810001, P.R.China)

Abstract: Lake Qinghai, the biggest inland lake and biggest saltwater lake in China, lies in the north-eastern part of the Qinghai Tibet Plateau. The lake is also an important vapour source for the special region. The dynamic variation of its water surface is a response of climate and environment around. In this study the long-time variation of Lake Qinghai was explored from time and space perspectives, based on the shoreline information which was extracted manually with moderate-high spatial resolution remote sensing imagery. The results showed that, as a whole the Lake Qinghai's area decreased from 1974 to 2004 and then increased till 2016. In 2004 the area was smallest, 4223.73 km², smaller by 253.80 km² than that in 1974. From 1974 to 1987 the water surface shrank sharply. While the variation range was relatively modest with mean value of 6.85 km² during the period from 2000 to 2009. During the last 7 years, the water surface increased by 128.27 km². In 2012, there was a sharp expansion with 65.12 km² larger than previous year; moreover the annual variation reached maximum, 59.18 km². The shoreline of Sand island, which lies in the east coast, varied significantly during the past few decades. From 1974 to 2004 the maximum back distance from the coastline was 4.59 km, and the value of annual variation was 0.39 km in 2012. The increase of precipitation in Lake Qinghai region, and the enlarging inflow runoff, which benefited directly from local ecological environment control measures implemented by government, are two important reasons to make the lake expanding in the last two decades.

Keywords: Lake Qinghai; water surface area; remote sensing monitoring

青海湖位于青藏高原东北部, 地处东亚季风、印度季风和西风激流三者汇聚带, 湖区西接青藏高原、东邻黄土高原、北部为沙漠干旱区, 是阻挡西部荒漠化向东蔓延的天然屏障。这种特殊的过渡性地理位置, 使得青海湖对气候变化敏感而强烈^[1-4]。作为我国最大的内陆咸水湖, 青海湖不但对环湖周边区域气候起着自

* 中国测绘科学研究院基本科研业务项目(7771512)资助。2016-10-31 收稿; 2017-01-07 收修改稿。骆成凤(1976~), 女, 博士, 副研究员; E-mail: chfluo@casm.ac.cn.

然调节器的作用,也是维系青藏高原东北部生态安全的重要水体. 青海湖早在 1997 年就被列为国家级自然保护区,湖区及环湖地区共有鸟兽 200 余种,被联合国列入国际重要湿地名录. 青海湖水情的动态变化是气候和周围生态环境状况的重要体现^[3,5],准确、及时地掌握青海湖水情信息对流域的生态环境保护和综合治理具有重要的意义.

我国学者一直关注气候变化和人类活动对青海湖水情的影响^[3-11],面积是湖泊水情的重要指标之一. 贾玉连等^[12]通过古湖泊遗迹恢复青海湖古湖面面积,认为与现代湖泊面积(4400 km², 1988 年)相比较,近四万年以来青海湖可能出现 3 次高湖面,面积分别为 8100、7039、6406 km²,其对应的湖面分别高出现代湖面 104、80 和 45 m. 冯松等^[4]研究发现,自 1880—1980 年左右,青海湖水位逐渐降低. 有研究者利用中低分辨率影像,如 1.1 km 分辨率的 NOAA/AVHRR 数据和 250 m 分辨率的 EOS/MODIS 数据,对青海湖面积的长时间序列变化情况进行监测,掌握近代青海湖面积变化的规律和趋势^[13-15]. 由于这类影像数据的连续性比较好,能很好地反映出青海湖年际间的面积变化趋势,但受影像分辨能力的限制,能感知的面积变化范围相对比较粗. 沈芳等^[16]采用 Landsat MSS 和 ETM⁺ 数据对青海湖 1975 年和 2000 年的面积进行了计算,并对这 25 年间的湖泊变迁及成因进行了分析. 刘宝康等^[17]采用环境减灾卫星 CCD 数据,利用多波段和单波段相结合的方法识别水体,对 2008—2011 年每年 4—11 月期间的青海湖面积进行动态监测. 冯钟奎等^[18]采用 Landsat TM 数据和分类的方法对青海湖 1986—2005 年 10 月下旬—11 月的水域变化进行了监测.

以往的青海湖面积监测工作受影像资源分辨率和获取时间的限制,对常水位下面积长时间序列监测和年内面积变化监测相对缺乏. 本研究依据青海湖水位年变化特点,充分利用中高分辨率遥感数据的连续性,选择每年的 8 月水位作为常水位代表对 1974 年以来的青海湖面积变化趋势进行监测,反映了近 40 余年青海湖面积变化的总趋势. 同时也对近 15 年来青海湖面积的年内变化进行了监测. 旨在更系统地掌握青海湖面积的动态变化规律,为青海湖及其流域的生态环境保护和湖泊面积持续监测提供依据.

1 数据与方法

1.1 青海湖概况

青海湖(36°32′~37°15′N, 99°36′~100°47′E)位于青海省境内,跨海晏、刚察和共和 3 个县. 青海湖湖心有海心山和三块石两个小洲,湖边主要岛屿有鸟岛、海西岛、沙岛、二郎剑等,周边小湖有尕斯库勒湖、新尕斯库勒湖、海晏湾、耳海(图 1). 青海湖是因地层断陷、倒淌河倒流而形成的^[19],现代湖体呈椭圆形,西北走向,周长约 360 km,东西长约 109 km,南北平均宽约 39.8 km. 水位在 3193.5 m 时,湖区水域面积为 4294 km²,容积为 785.2×10⁸ m³,平均水深 18.3 m,最大水深 26.6 m^[20].

青海湖是以降水补给为主的封闭湖泊,入湖的大小河流共计 50 余条,多为季节性河流. 湖区周围水系呈明显不对称状态分布,西北多,流量大;东南少,流量小,年地表总径流量为 15.35×10⁸ m³^[21]. 其中流域面积大于 300 km²的干流有 16 条,分布于流域西北部的布哈河、沙柳河的流量总和占全流域入湖流量的 73%以上^[22]. 青海湖位于青藏高原上,在中纬度西风带内,是我国和东亚天气的上游,这里属高原大陆性气候,冬寒夏凉,多年平均气温-0.7℃,呈南高北低的分布趋势;湖区降水多年平均值为 319~395 mm,雨量偏少,降水量由湖心向湖周山区递增;多年平均蒸发量约 800~1100 mm,雨热同季,干湿季分明^[11,23]. 20 世纪后半期,暖干是青海湖流域气候的主流,青海湖水位下降,面积呈缩减趋势^[3,24-25]. 青海湖流域处在不同生态(草原—沙漠)和地理(青藏高原—黄土高原)单元的结合点上,湿地、高寒草甸、草原、灌木林、耕地、沙丘等地表类别和鱼、鸟、兽等珍稀野生动物共同构成了青海湖地区特有的生态系统,是青藏高原生物多样性最丰富的宝库. 政府部门对青海湖地区生态给予了很高的重视,于 2008 年 5 月启动实施“青海湖流域生态环境保护与综合治理工程”,投资 15.68 亿元,计划在 10 年内最大程度恢复青海湖原生态^[26].

1.2 数据及预处理

青海湖面积监测所用的遥感数据源为 Landsat 系列卫星数据,传感器包括 Landsat-5 TM、Landsat-7 ETM 和 Landsat-8 OLI,分辨率为 30 m,重访周期为 16 天,轨道号为 133/34 和 133/35. 下社水文站的观测数据^①显

① 数据由青海省水文水资源勘测局提供.

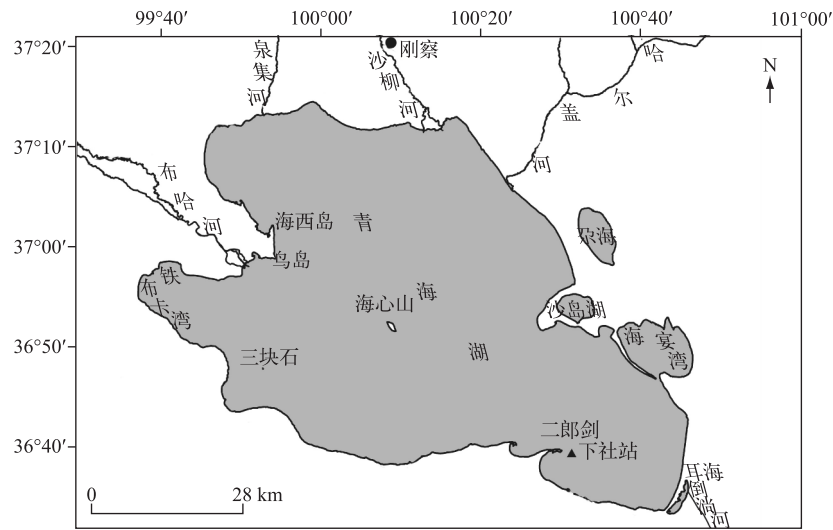


图 1 青海湖地理位置

Fig.1 The location of Lake Qinghai

示,2000—2008 年的最高月均水位出现在 9 月,为 3193.27 m;每年 1—5 月水位相对比较稳定(水位差为 0.02 m);6 月以后水位持续上升,至 9 月水位差达到 0.2 m;其中 8 月与 9 月的水位差为 0.05 m. 9 月至来年 1 月水位持续下降. 本研究选择每年 8 月作为常水位的代表月,监测自 1987—2016 年的湖体面积变化,选 6 月和 9 月面积差监测自 2002 以来的年内湖体面积变化. 数据获取时间以 8 月中旬为最佳,受云量影响无法直接提取水涯线时,参考最近时间的影像数据或者同时期的环境减灾卫星 CCD 数据辅助解译水涯线信息. 为了比较长时间序列的变化,利用 1974 年的数字栅格图数据(DRG)提取常水位的水涯线信息.

影像预处理工作主要是正射纠正,处理过程为:控制测量—空三加密^[27]—数字高程模型制作—正射影像制作. 其中青海湖区 GPS 控制点测量点共 38 个,采集时间为 2008 年 11 月,全部符合测绘行业标准和精度要求. 首先利用同时期 2.5 m 分辨率立体相对影像经过空三加密生成数字高程模型,并制作正射影像. 利用外业控制点和检查点对生成的正射影像进行检核,平均中误差为 5.40 m. 然后以高分正射影像和格网间距为 5 m 的数字高程模型对监测影像数据进行正射影像制作,多期影像间相对几何配准精度控制在 1 个像元以内.

1.3 面积计算

采用人工解译方式提取青海湖水涯线信息,解译过程中重点关注滩涂岸边水涯线的提取,同时参照同期的水位信息区分浅水区边界,平缓滩涂的水涯线不能交错. 为了尽可能地消除认知差异,所有水涯线的解译工作由同一个具有 1:10000 地形图编制经验的工作人员完成. 在岩质湖岸区,影像和水涯线之间的套合精度小于 1 个像元;在沙质湖岸区,套合精度小于 2 个像元. 以 2014 年为例,与青海湖水涯线相交的像素个数为 12455 个,每个像素 900 m²,假设平均每个像素内水体与非水体的面积各占 50%,则面积计算结果的误差约为±5.6 km².

青海湖面积包括主湖区及相连的水体面积,一直与主体湖区分开的小湖区(尕斯库勒湖)不记入湖区面积,不减除两个湖心洲(海心山和三块石)的面积. 为了与其他研究结果比较,这里采用高斯投影计算湖面面积,以 4244.2 km²为例,在 3200 m 高程投影面上面积为 4248.4 km²,差异约千分之一.

1.4 面积结果比较

不同分辨率的影像对湖泊岸线的识别能力不同. 理论上,在能准确区分水体和陆地的前提下,分辨率越高,岸线部分水与陆地混合像元中涉及的水域面积就越小,监测得到的湖泊面积就约接近实际值. 本研究对相同水位时 3 种不同分辨率影像数据识别得到的青海湖面积进行了对比. 这 3 种影像分别为:印度 CartoSat-

1号卫星影像,分辨率2.5 m,获取时间为2007年12月—2008年2月;中巴地球资源卫星 Chers 影像,分辨率19.5 m,获取时间为2008年12月;Landsat-5 TM 影像,分辨率30 m,获取时间为2007年8月.3种影像获取时青海湖的平均水位均为3193.35 m,对应的青海湖水面面积分别为4248.4、4251.5和4247.3 km².不同分辨率影像数据得到的面积差异小于5 km²,约为整个湖面面积的0.1%.

根据青海省第一次水利普查公报,青海湖水位在3193.5 m时,湖区水域面积(包括尕斯库勒湖)为4294 km².据下社水文站监测信息,2008年8月青海湖平均水位为3193.5 m,本研究计算得到的青海湖和尕斯库勒湖面积为4293.41 km².在已发表的青海湖面积监测相关文章中,本研究与文献[15]均给出了2001—2010年9月的青海湖面积.文献[15]中的面积值基于EOS/MODIS数据通过阈值法模型得到,包括尕斯库勒湖的面积.本研究中的面积值(包括尕斯库勒湖)比文献[15]中的值高,两者差异的均值约26 km².两者监测得到的青海湖面积变化趋势是一致的.沈芳等^[16]、刘宝康等^[17]和冯钟奎等^[18]对青海湖面积变化的研究都采用了30 m分辨率的影像数据,由于和本研究监测的月份不同,单个青海湖面积值的可比性不强.但对青海湖的年均变化趋势监测结果都比较一致,如冯钟奎等^[18]的研究结果显示1990—2004年青海湖面积持续减少,接着开始增大,这与本研究得到的变化趋势相同.

2 结果与分析

2.1 青海湖8月份面积变化

青海湖8月份水面面积监测结果显示,1974—2016年期间,青海湖面积总体上呈先减后增的变化趋势.2004年为面积变化拐点,减少至最小,为4223.73 km²,比1974年减少了253.80 km²,约为1974年湖面积的5.67%.2004年以来,青海湖面积持续增长,至2016年达到4367.18 km²,比2004年增加143.45 km²,但仍比1974年面积减少110.36 km²(图2).

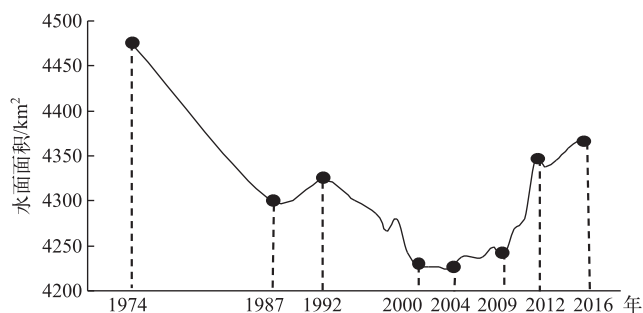


图2 1974—2016年青海湖8月份水面面积变化

Fig.2 Variation curve of water surface area of Lake Qinghai in August from 1974 to 2016

在青海湖水面面积减少的时间段内,1974—1987年期间面积骤减,17 a间减少176.52 km²;1987—1992年青海湖面积呈小幅增加,5 a间增加了22.38 km²;1992—2004年青海湖面积持续减小,12 a间减少了99.66 km²,但2000—2004年面积减少幅度相对较小.在青海湖水面面积增加的时间段内,2004—2009年期间,面积呈小幅增加,2009—2016年7 a间,水面面积增加了128.27 km²(图2).

2000—2009年期间青海湖水面面积变化幅度相对较小,面积平均值为4234.80 km²,是2004年水面面积的0.16%,平均变化幅度为6.85 km².其中2000—2001年面积减少14.54 km²,2004—2005年增加13.70 km²,2008年比前一年增加10.37 km²,2009年又减少了9.56 km²(图2).

1997年以来,相邻年间青海湖水面面积变化最大的年份分别为:2011—2012年,增加65.12 km²;1999—2000年,减少37.45 km²;2009—2010年,增加29.54 km².1997—2016年期间,相邻年间面积变化平均值为14.12 km².

2016年青海湖东边的尕斯库勒湖面积为45.71 km²,与1974年相比较,减少了3.20 km².1974—1992年,尕斯库勒湖面积减少了2.56 km²;1992—1999年,尕斯库勒湖的面积几乎没有变化;自2000年以来,尕斯库勒湖的面积变化幅度在0.77 km²以内,没有出现和青海湖面积一样的明显增大趋势,面积波动变化相对比较频繁.

2.2 青海湖年内面积变化

青海湖水面面积的年内变化通过每年9月和6月面积差异来体现(图3).2002—2016年期间,2012年的年内面积变化量为阶段最大,为59.18 km²,2009年为阶段最小,为0.93 km².其中,2002—2011年面积年

内变化量平均为 10.33 km^2 , 2007 年为阶段最大, 为 24.45 km^2 (由于缺乏 2008 年 9 月的影像, 这里不分析 2008 年的情况); 2005、2009 和 2010 年的年内变化量都小于 3.5 km^2 。从图 3 中可以看出, 面积年内变化量和面积基数没有必然联系, 2006 年的 6 月和 9 月面积均大于 2002 年, 小于 2010 年, 但 2006 年年内变化量比 2002 和 2010 年都大。2011 年以后, 青海湖 6 月和 9 月的面积明显比之前增大, 且面积的年内变化量也整体增加, 2012—2016 年面积年内变化量平均为 20.00 km^2 , 比 2002—2011 年期间年内变化量均值增加近一倍。与此同时, 除了 2012 年外, 面积年内变化基本比较平稳, 变幅小于 5 km^2 。

2002—2016 年青海湖东边尕斯海每年 9 月和 6 月面积差异平均值为 0.2 km^2 。与青海湖不同, 尕斯海面积的年内变化规律不明显, 面积最大值也不一定是出现在 9 月。从监测结果看, 2002 年以来, 有一半年份的面积最大值出现在 6 月; 有一半年份的面积变化量小于 0.05 km^2 。

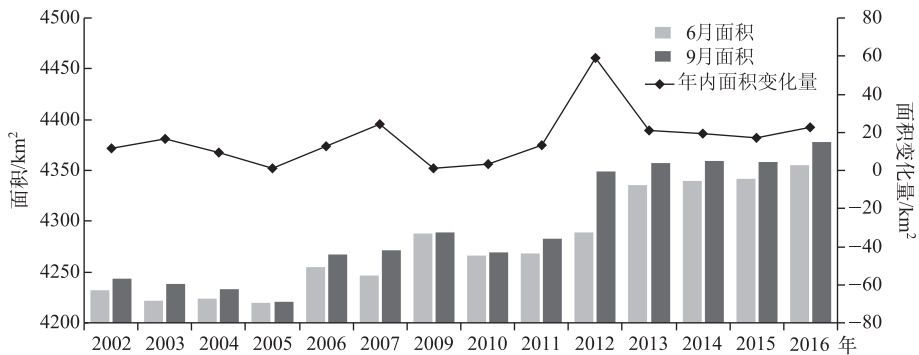


图 3 2002—2016 年青海湖年内水面面积变化

Fig.3 Annual variation curve of water surface area of Lake Qinghai from 2002 to 2016

2.3 青海湖岸线变化

青海湖岸线的变化主要发生在西岸海西岛、铁布卡湾、东岸沙岛、海晏湾、北岸沙柳河入口区以及南部二郎剑景区的沙嘴区 (图 4a), 这些岸线主要为砂质区域。东岸沙岛岸线的变迁尤其明显 (图 4b), 1974 年沙岛与主湖体连通, 随着湖岸线后退, 沙质地表裸露区域越来越大, 至 2004 年形成潟湖, 脱离了主湖体。这期间岸线后退最大距离达 4.59 km 。2004 年至今, 随着湖岸线前进, 湖水重新淹没了部分裸露区域, 潟湖扩大, 有与主湖体重新连通的迹象。与 2004 年相比, 2016 年岸线前进了 2.9 km 。在年内湖面面积变化比较大的 2012 年, 6—9 月期间, 沙岛岸线前进最大距离为 0.39 km 。

青海湖西岸海西岛是另一个岸线变化比较大的区域 (图 4c), 1974—2004 年期间海西岛岸线后退的最大距离为 3.20 km 。海西岛毗邻鸟岛, 岸线变化对周围鸟类栖息环境影响比较大。2004 年以来, 岸线持续前进, 至 2016 年前进了 1.41 km 。年内岸线变化相对比较大, 在监测时间段内, 岸线最大变化距离出现在 2013 年, 为 0.72 km 。

受岸线区域砂质的影响, 铁布卡湾北部岸线也随青海湖面积变化而出现前进或后退 (图 4d), 与 1974 年相比, 铁布卡湾在 2004 年岸线变动最大距离为 2.49 km 。2004 年以后, 这里的岸线随着湖面积的增加而前进, 至 2016 年, 又前进了 1.25 km 。在年度岸线变化最大的 2012 年, 这里的最大变化距离为 0.18 km 。

位于青海湖北部的沙柳河是重要的入湖流量补给河, 流量贡献仅次于布哈河。沙柳河口的岸线变化也比较明显。在青海湖面积减小的 1974—2004 年间, 该河口的岸线后退了 2.14 km ; 而 2004—2016 年, 这里的岸线又向前推进了 1.2 km 。2012 年, 受入湖流量的季节变化影响, 沙柳河口的岸线的最大变化距离达到了 0.91 km 。

2.4 变化原因分析

青海湖基本上是一个封闭的内陆湖泊^[3], 近 600 a 来的水位升降与降水密切相关^[4], 降水量、径流量及蒸发量直接主导着青海湖水位和面积的变化^[7,28]。1973—1984 年和 1990—2001 年是两个相对较长时期的少雨阶段^[29], 1977—1981 年和 1998—2004 年青海湖水面蒸发量增加^[30], 与 1974—2004 年青海湖水面面积的减少趋势相对应。自 2004 年以来, 青海湖地区降水增多, 主要入湖河流径流量增加, 是水面面积增加的主

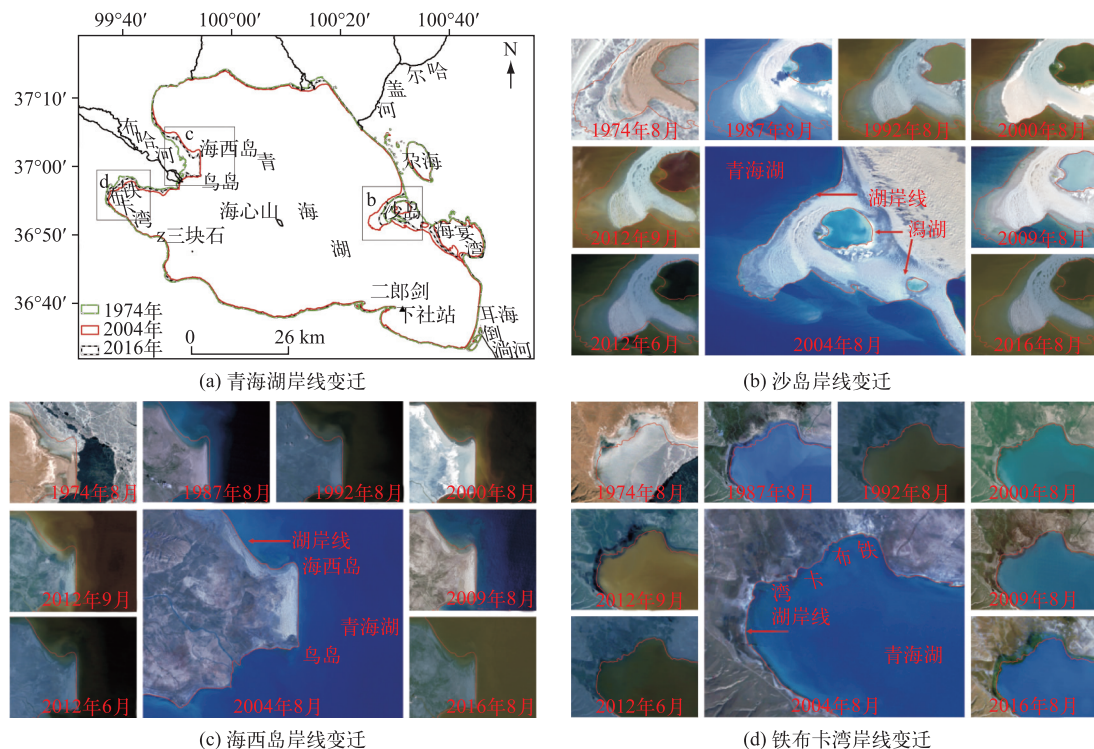


图 4 1974—2016 年青海湖岸线变迁示意图
(所有年份的岸线变迁都以 2004 年岸线作为参照)

Fig.4 Changes of the shoreline in Lake Qinghai from 1974 to 2016

要原因. 青海湖周边气象站监测数据^①显示, 与 1974—2004 年相比, 2005—2015 年的年均降水量增加 44.1 mm. 2000—2009 年期间的年均降水量为 395.9 mm. 2010—2015 年, 年均降水量持续增加, 平均值为 423.2 mm. 2012 年 7 月累计降水量比多年同期均值增加 50% 左右, 直接导致同年 8 月青海湖面积明显扩张. 与 1987—2004 年的年均蒸发量相比, 2005—2015 年的年均蒸发量减少了 158.5 mm (图 5).

虽然已有研究指出人类活动耗水并非青海湖水位和面积变化的主导因素^[7, 11, 28-29], 但政府近年来在青海湖流域实施的一系列生态环境治理措施, 包括: 减少牲畜、退耕还草、植被恢复、人工增雨、河流治理等, 都有利于入湖河流径流量增加^[26], 促使青海湖面积增加. 尤其是对布哈河等 6 条入湖河流近湖区 200 km 河道的清理, 以及附近小型电站、水坝的拆除都会直接导致入湖河流径流量增加. 布哈河口和沙柳河的水文监测数据^②显示 (图 6), 与 1974—2004 年相比, 2005—2015 年期间这两条河流的平均年径流量分别增加 54.1% 和 39.0%, 即 3.91×10^8 和 0.99×10^8 m³. 2009—2012 年青海湖面积骤增, 这期间刚察站年均降水量为 401.9 mm, 布哈河口和沙柳河的年均径流量之和为 17.45×10^8 m³. 2004—2007 年刚察站年均降水量为 428.3 mm, 略高于 2009—2012 年, 同期这两条河流的年均径流量为 13.26×10^8 m³.

3 结论与讨论

青海湖是青藏高原东北部的重要水汽源, 其水面面积的变化与整个高原的气候变化密切相关. 近半个世纪以来, 青藏高原气候出现了由暖干向暖湿方向的转型^[31-33], 且暖湿化程度明显^[34-35], 青藏高原湖泊面积显著

① 数据由中国气象局气象数据中心提供.

② 数据由青海省水文水资源勘测局提供.

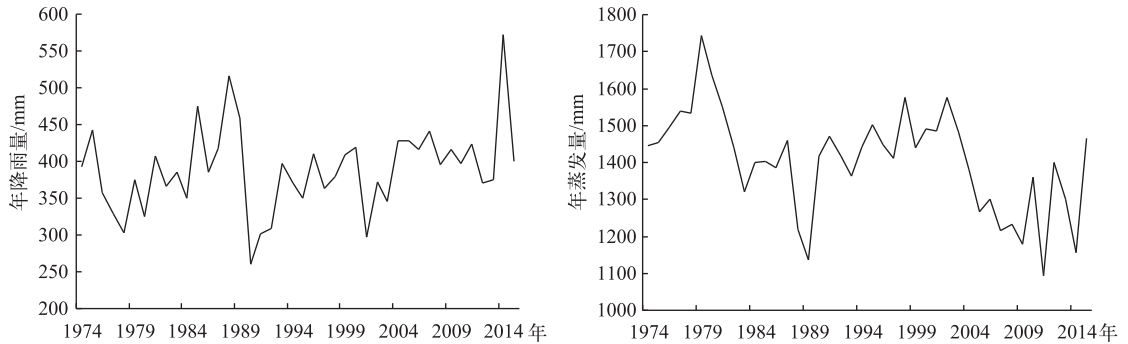


图 5 刚察站 1974—2015 年降水量及蒸发量的年际变化

Fig.5 Variation of annual precipitation and evaporation at Gingham Station from 1974 to 2015

扩张^[31,34,36-38]. 高原东北部降水量呈现先减少后增加的趋势^[37],位于这里的青海湖水面面积变化也响应了这种变化趋势. 1974—2004 年青海湖水面面积减少了 253.8 km²,约为 1974 年水面面积的 5.67%. 长时期的少雨和蒸发量增加是导致 1974—2004 年其面积缩减的主要原因. 2004 年以来,青海湖面积持续增加,其中 2009—2012 年面积增加了 106.57 km²,之后增长趋缓,2016 年 8 月面积为 4367.18 km². 这一时期青海湖面积持续增长,主要得益于该地区降水增多以及入湖河流径流量的增加.

湖泊岸线时刻处于一种动态变化的过程中,利用遥感技术手段监测青海湖面积,只能反映其瞬时水位. 但青海湖岸线的变化是相对简单的,利用同一时期的遥感影像可以将其面积变化特点反映出来. 本研究表明利用 30 m 分辨率的遥感影像监测青海湖面积,结果可靠,性价比较高,可以用于后续的青海湖水面面积的长期动态变化监测. 本研究结合气象和水文数据分析了近 20 余年青海湖面积变化的原因,发现生态环境保护工程的实施促进了水面面积的增长,但对增长的程度以及时效有待参考其他资料进行深入的分析.

青海湖面积变化与环湖区域生态环境密切相关. 水面萎缩的过程中,砂质区松散的砂砾逐渐裸露,使周围的沙源增加,导致区域沙化面积不断扩大,周围植被覆盖状况变差,鸟类栖息地环境受到一定程度的影响. 这种状况在西岸的海西岛、东岸的沙岛、海晏湾等区域特别明显,这些区域同时也是湖周边主要旅游景区,受人类参观活动的影响,即使在青海湖水面扩张的过程中,其生态环境状况改善也比较缓慢. 所以我们应该有意识地加强这些区域的生态环境保护,尽量减少人为干涉,保护鸟类栖息环境.

4 参考文献

- [1] Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences ed. Qinghai Lake comprehensive investigation report. Beijing: Science Press, 1979. [中国科学院兰州地质研究所. 青海湖综合考察报告. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [2] Yin Daosheng. The position and value of Qinghai Lake in scientific research. *Qinghai Meteorology*, 1995, (2): 2-3. [尹道声. 青海湖在科学研究中的地位与价值. 青海气象, 1995, (2): 2-3.]
- [3] Fan Jianhua, Shi Yafeng. On the impact of climate change on Qinghai Lake hydrological analysis of the past 30 years period. *Science in China: Chemistry*, 1992, 22(5): 537-542. [范建华, 施雅风. 气候变化对青海湖水情的影响——I. 近 30 年时期的分析. 中国科学: 化学, 1992, 22(5): 537-542.]

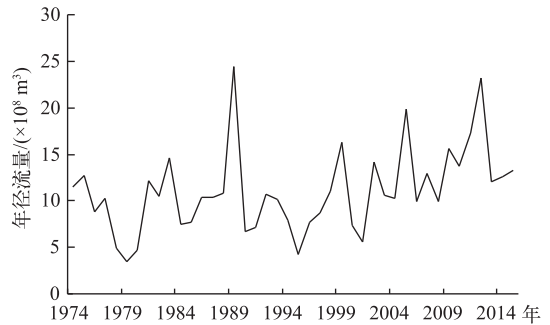


图 6 1974—2015 年布哈河口和沙柳河径流量的年际变化

Fig.6 Annual variation of runoff in Buha and Shaliu Rivers from 1974 to 2015

- [4] Feng Song, Tang Maocang, Zhou Lusheng. Level fluctuation in Qinghai Lake during the Last 600 Years. *J Lake Sci*, 2000, **12**(3): 205-210. DOI: 10.18307/2000.0303. [冯松, 汤懋苍, 周陆生. 青海湖近 600 年的水位变化. 湖泊科学, 2000, **12**(3): 205-210.]
- [5] Zhou Lihua, Chen Guichen, Peng Min. The impact of human activities on the water level of Qinghai Lake. *J Lake Sci*, 1992, **4**(3): 32-36. DOI: 10.18307/1992.0305. [周立华, 陈桂琛, 彭敏. 人类活动对青海湖水位下降的影响. 湖泊科学, 1992, **4**(3): 32-36.]
- [6] Fan Jianhua, Shi Yafeng. On the impact of climate change on the Qinghai Lake water. Historical analysis and future research situation. *Science in China: Chemistry*, 1992, **22**(6): 657-662. [范建华, 施雅风. 气候变化对青海湖水情的影响——II. 历史时期分析和未来情景研究. 中国科学: 化学, 1992, **22**(6): 657-662.]
- [7] Li Yan, Duan Shuiqiang, Jin Yongming. Analysis of features and causes of Qinghai Lake during the period of 1956–2011. *Yellow River*, 2014, (6): 87-89. [李燕, 段水强, 金永明. 1956—2011 年青海湖变化特征及原因分析. 人民黄河, 2014, (6): 87-89.]
- [8] Zhou Lusheng, Wang Qingchun. Analysis and forecast for interannual variation of the Qinghai Lake's water level. *Plateau Meteorology*, 1996, (4): 478-484. [周陆生, 汪青春. 青海湖水位年际变化规律的分析和预测. 高原气象, 1996, (4): 478-484.]
- [9] Li Fengxia, Li Lin, Shen Fang *et al.* Evolution of lake shore shape of Qinghai Lake and its causes. *Resource Science*, 2004, **26**(1): 38-44. [李凤霞, 李林, 沈芳等. 青海湖湖岸形态变化及成因分析. 资源科学, 2004, **26**(1): 38-44.]
- [10] Peng Min, Chen Guichen, Zhou Lihua. Relationship between descending of Qinghai Lake level and human activities. *Scientia Geographica Sinica*, 1994, **14**(2): 127-135. [彭敏, 陈桂琛, 周立华. 青海湖水位下降与湖区人为耗水关系的研究. 地理科学, 1994, **14**(2): 127-135.]
- [11] Guo Wu. Studies on changes in stage and evolution of ecological environment for the Qinghai Lake. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 1997, (2): 75-80. [郭武. 青海湖水位下降与湖区生态环境演变研究. 干旱区资源与环境, 1997, (2): 75-80.]
- [12] Jia Yulian, Shi Yafeng, Fan Yunqi. Water balance of paleolake Qinghai and its precipitation estimation at three high lake-level stages since 40 kaBP. *J Lake Sci*, 2000, **12**(3): 211-218. DOI:10.18307/2000.0304. [贾玉莲, 施雅风, 范云崎. 四万年以来青海湖的三期高湖面及其降水量研究. 湖泊科学, 2000, **12**(3): 211-218.]
- [13] Liu Ruixia, Liu Yujie. Area changes of Lake Qinghai in the latest 20 years based on remote sensing study. *J Lake Sci*, 2008, **20**(1): 135-138. DOI: 10.18307/2008.0121. [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**(1): 135-138.]
- [14] Yin Qingjun, Yang Yinglian. Remote sensing monitoring of lake qinghai based on EOS/MODIS data. *J Lake Sci*, 2005, **17**(4): 356-360. DOI: 10.18307/2005.0413. [殷青军, 杨英莲. 基于 EOS/MODIS 数据的青海湖遥感监测. 湖泊科学, 2005, **17**(4): 356-360.]
- [15] Li Xiaodong, Xiao Jianshe, Li Fengxia *et al.* Remote sensing monitoring of the Qinghai Lake based on EOS/MODIS Data in recent 10 years. *Journal of Natural Resources*, 2012, **27**(11): 1962-1970. [李晓东, 肖建设, 李凤霞等. 基于 EOS/MODIS 数据的近 10a 青海湖遥感监测. 自然资源学报, 2012, **27**(11): 1962-1970.]
- [16] Shen Fang, Kuang Dingbo. Remote sensing investigation and survey of Qinghai Lake in the past 25 years. *J Lake Sci*, 2003, **15**(4): 289-296. DOI: 10.18307/2003.0401. [沈芳, 匡定波. 青海湖最近 25 年变化的遥感调查与研究. 湖泊科学, 2003, **15**(4): 289-296.]
- [17] Liu Baokang, Wei Xuli, Du Yu'e *et al.* Dynamics of Qinghai Lake area based on environmental mitigation satellite data. *Pratacultural Science*, 2013, **30**(2): 178-184. [刘宝康, 卫旭丽, 杜玉娥等. 基于环境减灾卫星数据的青海湖面积动态. 草业科学, 2013, **30**(2): 178-184.]
- [18] Feng Zhongkui, Li Xiaohui. Remote sensing monitoring study for water area change and lakeshore evolution of Qinghai Lake in last 20 years. *Journal of Palaeogeography*, 2006, **8**(1): 131-141. [冯钟葵, 李晓辉. 青海湖近 20 年水域变化及湖岸演变遥感监测研究. 古地理学报, 2006, **8**(1): 131-141.]
- [19] Sun Jianchu. Qinghai Lake. *Geology Review*, 1938, **3**(5): 507-512. [孙健初. 青海湖. 地质论评, 1938, **3**(5): 507-512.]
- [20] Water Resources Department of Qinghai Province, Bureau of Statistics of Qinghai Province. The communiqué of first Water Resources Census of Qinghai Province. *Qinghai Daily*, 2013.05.28. [青海省水利厅, 青海省统计局. 青海省第一次水利普查公报. 青海日报, 2013.05.28.]
- [21] Zhu Yan, Cui Guangbo, Yang Jue. Causes of shrinking and drying up of Qinghaihu Lake, trend of development and its impact on ecological environment. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2001, **29**(4): 104-108. [朱琰, 崔广柏,

- 杨珏. 青海湖萎缩干涸原因、发展趋势及对生态环境的影响. 河海大学学报: 自然科学版, 2001, **29**(4): 104-108.]
- [22] Qinghai Province Water Resources Committee Office ed. Rivers of Qinghai. Xining: Qinghai people's Publishing House, 1995: 125-139. [青海省水利志编委会办公室. 青海河流. 西宁: 青海人民出版社, 1995: 125-139.]
- [23] Li Fengxia, Fu Yang, Yang Qiong *et al.* Climate change and its environmental effects in the surrounding area of Qinghai Lake. *Resources Science*, 2008, **30**(3): 348-353. [李凤霞, 伏洋, 杨琼等. 环青海湖地区气候变化及其环境效应. 资源科学, 2008, **30**(3): 348-353.]
- [24] Shao Yuhong, Zhang Zhanfeng. Climate change over the past 40 years in the Qinghai Lake region. *Qinghai Meteorology*, 2001, (1): 22-25. [邵玉红, 张占峰. 青海湖地区 40 多年来的气候变化. 青海气象, 2001, (1): 22-25.]
- [25] Liu Xiaoyuan. Analysis on the change trend of water level of Qinghai Lake. *Arid Zone Research*, 2001, **18**(3): 58-62. [刘小园. 青海湖水位变化趋势分析. 干旱区研究, 2001, **18**(3): 58-62.]
- [26] Liu Weidong. The ecological environment protection and comprehensive governance project in the Qinghai Lake basin has been obtained notable results. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/102/content-628857.html>. [刘维栋. 青海湖流域生态环境保护与综合治理工程成效明显. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/102/content-628857.html>.]
- [27] Zhang Jianqing, Pan Li, Wang Shugen eds. Photogrammetry. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. [张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.]
- [28] Jin Zhangdong, Zhang Fei, Wang Hongli *et al.* The reasons of rising water level in Lake Qinghai since 2005. *Journal of Earth Environment*, 2013, (3): 1355-1362. [金章东, 张飞, 王红丽等. 2005 年以来青海湖水位持续回升的原因分析. 地球环境学报, 2013, (3): 1355-1362.]
- [29] Li Lin, Zhu Xide, Wang Zhenyu *et al.* Impacting factors and changing tendency of water level in Qinghai Lake in recent 42 years. *Journal of Desert Research*, 2005, **25**(5): 689-696. [李林, 朱西德, 王振宇等. 近 42 a 来青海湖水位变化的影响因子及其趋势预测. 中国沙漠, 2005, **25**(5): 689-696.]
- [30] Chen Liang, Chen Kelong, Liu Baokang *et al.* Characteristics of climate variation in Qinghai Lake basin during the recent 50 years. *Journal of Arid Meteorology*, **29**(4): 483-487. [陈亮, 陈克龙, 刘宝康等. 近 50a 青海湖流域气候变化特征分析. 干旱气象, 2011, **29**(4): 483-487.]
- [31] Yan Lijuan, Zheng Mianping, Wei Lejun. 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. [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.]
- [32] Santos MCGD, Freire CMA. Climate change impacts on forests. In Climate change 1995: impacts, adaptations and mitigation of climate change, Contribution of Working. *Matéria*, 2013, **18**: 1576-1586.
- [33] Thomes JE. IPCC, 2001: Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 2001. No. of pages: 1032. Price: £ 34.95, ISBN 0-521-01500-6 (paperback), ISBN 0-521-80768-9 (hardback). *International Journal of Climatology*, 2002, **22**(10):1285-1286.
- [34] 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 Lake Sci*, 2014, **26**(4): 535-544. DOI: 10.18307/2014.0407. [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. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 535-544.]
- [35] Zheng MP, Qi W, Jiang XF *et al.* Trend of salt lake changes in the background of global warming and tactics for adaptation to the changes. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2004, **78**(3): 795-807.
- [36] Sun F, Zhao Y, Gong P *et al.* Monitoring dynamic changes of global land cover types; fluctuations of major lakes in China every 8 days during 2000-2010. *Science Bulletin*, 2014, **59**(2): 171-189.
- [37] 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. *Science Bulletin*, 2014, **59**(10): 1021-1035.
- [38] Che Xianghong, Feng Min, Jiang Hao *et al.* Detection and analysis of Qinghai-Tibet Plateau lake area from 2000 to 2013. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, **17**(1): 99-107. [车向红, 冯敏, 姜浩等. 2000-2013 年青藏高原湖泊面积 MODIS 遥感监测分析. 地球信息科学学报, 2015, **17**(1): 99-107.]