

1973—2018 年青海湖岸线动态变化*

祁苗苗^{1,2}, 姚晓军^{2**}, 刘时银¹, 朱 钰¹, 高永鹏¹, 刘宝康³

(1: 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091)

(2: 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

(3: 天水师范学院资源与环境工程学院, 天水 741000)

摘要: 青海湖独特的地理位置使得其不仅对环湖周边区域气候起着天然调节器的作用, 而且还拥有丰富的湖岸线资源, 准确、及时地掌握青海湖岸线动态变化对保护沿湖生态环境有重要意义. 因此本文基于 1973—2018 年 Landsat MSS/TM/OLI 遥感影像和 1961—2017 年实测水位资料, 对青海湖岸线动态变化及对鸟类栖息地的影响进行研究, 同时结合面积、水位及气象数据讨论了影响岸线变化的主要因素. 研究表明: (1) 近 45 年来青海湖岸线发生变化最大的区域是东岸的沙岛, 西岸的鸟岛、铁布卡湾及北岸沙柳河入口区域. 尤其自 2004 年以来, 鸟岛地区岸线后退距离最大 (5.52 km), 鸟类栖息地扩张约 97.94 km², 为鸟类提供了较好的栖息环境. (2) 1973—2018 年青海湖岸线长度以 0.88 km/a 的速率逐渐延长. 1997 年之前岸线长度呈较为平稳的上升趋势, 1997—2004 年呈波动下降趋势, 2004 年之后呈剧烈波动增加趋势, 岸线曲折性也表现出相同的变化趋势. (3) 总体上岸线长度和曲折性受水位和面积的影响并不显著, 但在不同的水位情况下, 二者对青海湖动态变化做出不同的响应. 尤其当水位小于 3193.3 m 或面积小于 4249.3 km² 时, 岸线曲折性会随着水位和面积变化呈现相同的变化趋势, 而水位高于 3193.3 m 时, 岸线曲折性一直在增加, 且水位上升速率越大则曲折性年际变化越大. (4) 1973—2004 年间青海湖水位下降和土地沙漠化是造成湖岸线变化的直接成因, 人类活动及草场退化加速了湖泊岸线的变迁. 2004 年之后, 随着青海湖水位回升与面积扩张, 岸线逐渐后退, 尤其在 2017—2018 年岸线后退距离最大.

关键词: 青海湖; 鸟类栖息地变化; 湖岸线长度; 岸线曲折性

Dynamic change of Lake Qinghai shoreline from 1973 to 2018*

QI Miaomiao^{1,2}, YAO Xiaojun^{2**}, LIU Shiyin¹, ZHU Yu¹, GAO Yongpeng¹ & LIU Baokang³

(1: *Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650091, P.R.China*)

(2: *College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, P.R.China*)

(3: *College of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, P.R.China*)

Abstract: The unique geographical location of Lake Qinghai not only plays a role as a natural regulator for the climate around the lake, but also has abundant resources on the shoreline. Accurate and timely grasp of the shoreline dynamic changes of Lake Qinghai is of great significance to protect the ecological environment along the lake. Based on Landsat MSS/TM/OLI remote sensing images from 1973 to 2018 and water level data from 1961 to 2017, this paper studied the changes of shoreline and its impact on bird habitats. At the same time, the main factors affecting shoreline changes were discussed in combination with area, water level and meteorological data. The main conclusions are as follows: (1) In the past 45 years, the areas with the greatest changes in the shoreline of Lake Qinghai have been the Lake Shadao on the east coast, the Bird Island on the west coast, the Tiebuka Bay and the entrance to the Shaliu River on the north coast. Especially since 2004, the shoreline in the Bird Island had the largest retreat distance (5.52 km) and bird habitat expansion was about 97.94 km², which provided a better habitat for birds. (2) The length of the Lake Qinghai shoreline gradually extended at a rate of 0.88 km/a from 1973 to 2018. Before 1997, the length of the shoreline showed a relatively steady upward trend. Then, it showed a fluctuating downward trend from 1997 to 2004. After 2004, it showed a sharp in-

* 2019-06-26 收稿; 2019-09-09 收修改稿.

国家自然科学基金项目 (41861013, 41761144075, 41801052) 和云南大学引进人才科研项目 (YJRC3201702) 联合资助.

** 通信作者; E-mail: yaoxj_nwnu@163.com.

crease in volatility, and the shoreline tortuosity also showed the same trend. (3) The overall shoreline length and tortuosity were not significantly affected by water level and area, but they responded differently to the dynamic changes of Lake Qinghai under different water levels. Especially when the water level was less than 3193.3 m or the area was less than 4249.3 km², the tortuosity of the shoreline showed the same trend with the change of water level and area. While the water level was higher than 3193.3 m, the tortuosity of the shoreline had been increasing, and the greater the rate of water level rise, the greater the annual variation of tortuosity. (4) The water level decline and land desertification of Lake Qinghai from 1973 to 2004 were the direct causes of lakeshore changes. Human activities and grassland degradation accelerated the change of lake shoreline. After 2004, as the water level of Lake Qinghai rebounded and the area expanded, the coastline gradually receded, especially during 2017–2018.

Keywords: Lake Qinghai; bird habitat change; lake shoreline length; lake shoreline tortuosity

湖泊作为陆地水圈的重要组成部分,是连接地球表层冰冻圈、大气圈、水圈和生物圈的纽带,湖泊水量变化是其所在流域水量平衡综合作用的结果^[1]. 湖泊强烈萎缩或扩张对自然环境和人类生活影响巨大,逐渐受到学术界的广泛关注^[2-3]. 青海湖位于青藏高原东北部,地处东亚季风、印度季风和西风急流三者汇聚带,同时湖区北接沙漠干旱区,东邻黄土高原,西属青藏高原. 作为我国最大的内陆咸水湖,这种独特的过渡性地理位置,使得青海湖不仅对环湖周边区域气候起着天然调节器的作用^[4-5],而且还拥有丰富的湖岸线资源. 据青海省水文水资源勘测局提供的数据,受流域内降水增多影响,自2004年以来青海湖水位不断上升、面积逐渐扩大. 2018年对青海湖进行实地考察时发现由于水位上升,湖岸线扩张直接导致珍稀野生动物栖息地萎缩,同时鸟岛保护区码头、停车场和部分建筑物被湖水淹没或破坏. 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,因此准确、及时地掌握青海湖动态状况对保护生态环境有重要意义.

湖泊的形态特征指湖泊的湖盆结构及其大小,是内、外力及人为因素长期相互作用下的综合反映,其形成过程错综复杂^[6]. 湖盆结构通常由沿岸带、亚沿岸带和湖心敞水带或深水带3部分组成,诸多的湖沼学过程影响着水生植物的种类与分布,同时水生植物也对湖泊或水库物理、化学、生物特征产生影响,特别是在沿岸带区域^[7]. 湖岸线较为复杂的水域可以增加水体与陆地的接触面,有着改善水体循环和增强湿地净化能力的作用,从而能够支持相对高的生物多样性^[8]. 一般而言,在湿地公园鸟类栖息地营建研究中设计岸线时,会适当延长岸线的长度,增加岸线的曲折不规则形式为鸟类提供理想的栖息生境^[9]. 此外,湖岸线时序变迁的监测对合理开发青海湖岸线资源、保护生态环境及促进沿湖地区的经济发展具有重要意义^[10]. 目前对青海湖动态变化研究主要集中于湖泊形态特征(如水位、面积、水量等),而对其湖岸线动态变化的研究相对缺乏. 因此本文基于高分辨率 Landsat 遥感影像监测青海湖岸线动态变化,以期应用于青海湖沿湖地区生态环境保护和沿岸地区开发等研究;同时基于青海湖下社水文站提供的长时间序列水位数据,研究青海湖水位变化对岸线曲折性造成的影响.

1 青海湖概况

青海湖(36.53°~37.25°N, 99.60°~100.78°E)位于我国青藏高原东北部,是我国境内最大的咸水湖(图1). 湖边主要岛屿有鸟岛、海西岛、沙岛、二郎剑,湖中有海心山和三块石两个湖心岛. 湖区东面自北向南依次分布有尕斯库勒湖、沙岛湖、海晏湾和洱海4个子湖. 青海湖平均海拔为3200 m,湖岸线长度为445 km,岸线曲折,湖面略呈“凸”形,东西长约109 km,南北宽约39.8 km,湖水呈弱碱性,水位在3193.8 m时,湖区水域面积为4294 km²,平均水深18.3 m,最大水深26.6 m^[11]. 近年来受流域内降水量增多影响,青海湖水位不断上升、面积逐渐扩大.

青海湖流域属典型高寒干旱大陆性气候,并因自身“湖泊效应”具有明显的地区性气候特征:终年气温偏低且日温差较大,寒冷期长,年平均气温在-1.0~1.5℃之间,并呈东南向西北逐渐降低的趋势^[12]. 湖区四季多风且风力强劲,太阳辐射强,多年平均降水量为319~395 mm,集中于6~9月^[10]. 青海湖是以降水补给为主的封闭湖泊,入湖河流约50条,多为季节性河流,主要有布哈河、沙柳河、泉吉河、哈尔盖河等. 其中布哈河流量最大,约占入湖总流量的60%^[12]. 青海湖通常于每年12月中旬开始冻结,翌年1月上旬完全冻结,全湖形成稳定的冰盖. 3月中下旬封冻的青海湖开始消融,至4月上旬完全消融^[13]. 由于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)结合点上,复杂多样的地形、气候、水文等条件导致该地

区的植被类型多样,是青藏高原生物多样性最丰富的宝库,被誉为“青藏高原基因库”。

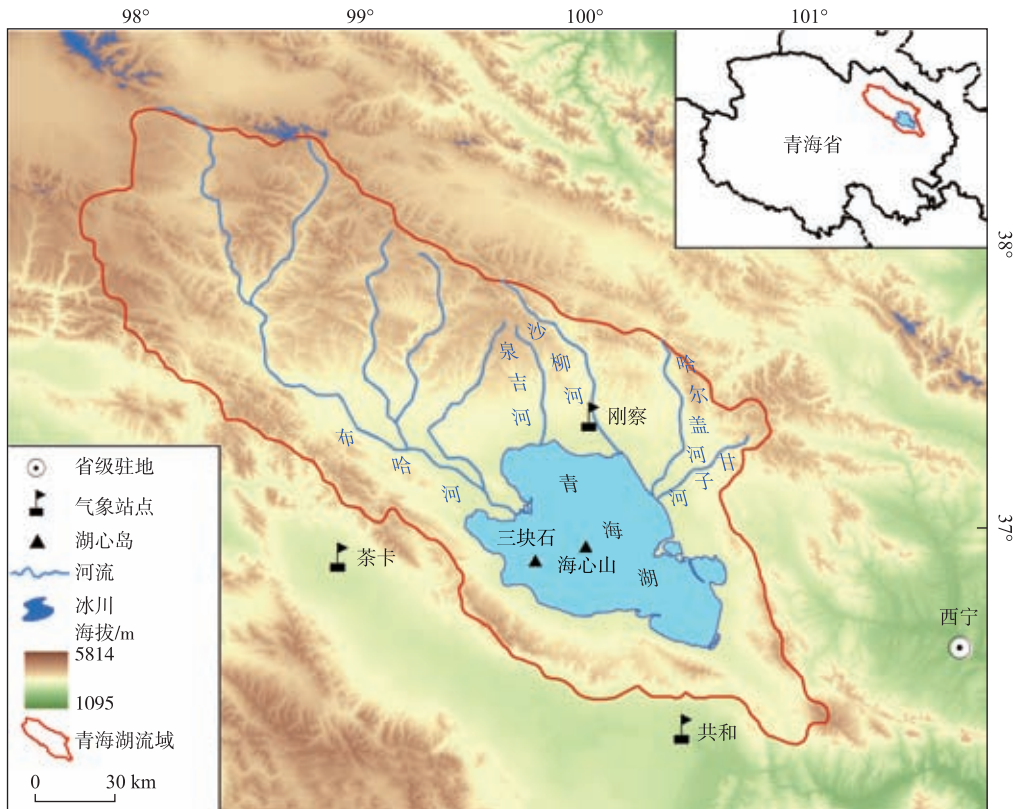


图1 青海湖及周边概况

Fig.1 Location and surrounding of Lake Qinghai

2 数据与方法

2.1 数据源

本文主要基于 Landsat 遥感影像监测青海湖 1973—2018 年湖岸线变迁状况. 为避免 Landsat ETM⁺ 影像数据条带丢失的影响, 本文尽可能选择 Landsat MSS/TM/OLI 遥感影像来获取岸线信息. 由于内陆湖泊季节性变化较大^[14], 为减少湖泊年内变化的影响, 考虑青海湖区 10 月份农业灌溉引水活动结束, 同时气温下降、降水减少, 冰川和积雪融水过程相对缓慢, 及 11—12 月份湖泊较少受人为或降水过程影响, 因此影像选取主要集中于该时段. 经统计, 在 USGS (<http://glovis.usgs.gov>) 网站共下载 1973—2018 年 90 景云量较少且质量较好(湖区上空没有云层覆盖)的遥感影像.

选用距离青海湖最近的两个气象站—刚察及共和站气温、降水及蒸发数据作为青海湖气候背景参考, 该数据从中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/site>) 免费获取. 此外, 本文基于青海湖周边 11 个自动气象站数据来验证刚察及共和站数据是否可直接用于评估水量变化影响因素, 该站点数据隶属于 2008 年三江源项目和海北州新一代天气雷达项目; 布哈河和沙流河径流量数据来源于青海省水文水资源勘测局.

2.2 研究方法

2.2.1 青海湖岸线信息提取 基于遥感影像的水体信息提取方法主要有波段比值法、水体指数法和“全局—局部”分布迭代法等^[15-16], 这些方法通常需要较高质量的影像, 且易受混合像元影响. 由于本研究所涉及 Landsat 遥感影像数量不多, 为提高解译精度均采用人工目视解译方法获取 1973—2018 年 45 期青海湖岸线

矢量数据,采用屏幕数字化方式将精度控制在一个像元之内. 青海湖由主湖区与相连水体(沙岛湖)两部分构成,为与已有研究成果做比较,与主湖区分开的尕海和洱海不计入湖区面积,同时也不减除2个湖心岛(海心山和三块石)的面积. 计算青海湖面积误差若不考虑混合像元的影响,则湖泊岸线每个像元有50%的湖泊面积被包含或者排除在外,因此人工目视解译带来的相对误差平均为0.1%.

2.2.2 基于水位-面积关系的青海湖水量平衡估算 湖泊水量平衡(水量净收支)最终表现为面积和水位的变化. 本文基于湖泊水位和面积构建的湖泊蓄水量变化模型,估算1973—2018年水量平衡整体状态^[17]:

$$dV = A \cdot H \, dA \, dH \quad (1)$$

即:

$$V = \int_{H_1}^{H_2} \int_{A_1}^{A_2} dA \, dH = \frac{A_1 + A_2}{2} (H_2 - H_1) \quad (2)$$

式中, V 表示湖泊水位(m)从 H_1 变化到 H_2 时蓄水量的变化量(m^3), A_1 和 A_2 分别指湖泊面积变化前、后的值(m^2),1961—2017年蓄水量的变化量之和即为研究时段内的青海湖水量平衡整体状态.

2.2.3 湖岸线发育系数 湖岸线发育系数(shoreline development index, SDI)被用来评估岸线的不规则程度^[18]. 作为常用的湖泊几何形态学指标用于简单的描述湖泊沿岸带范围,广泛运用于对不同湖泊的分类以及评价其沿岸带的重要性^[19].

$$SDI = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}} \quad (3)$$

式中, SDI 表示岸线发育系数, L (km)和 A (km^2)分别表示青海湖岸线长度和面积.

3 结果

3.1 青海湖岸线变化

近45年来,青海湖岸线处于动态变化过程,变化最大的区域主要是青海湖东岸的沙岛(A),西岸的鸟岛(B)和铁布卡湾(C)及北岸沙柳河入口(D)区域(图2). 其中,鸟岛和沙岛区域湖岸线的变化在4个地区中最为明显,尤其是随着水位上涨鸟岛地区岸线后退直接造成鸟类栖息地萎缩. 4个区域湖岸线的变化图按照顺时针方向排列,如图3~6.

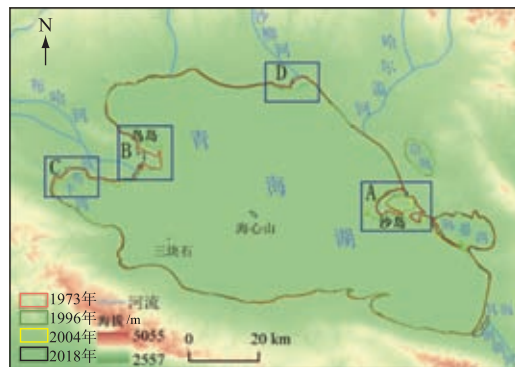


图2 近45年湖岸线发生变化最大的区域

Fig.2 The region with the greatest changes in lake shoreline in recent 45 years

鸟岛坐落在青海湖的西北隅(图2),分为一东一西两岛,是我国以保护水禽为主的国家级自然保护区. 近年来随着青海湖动态变化导致鸟岛地区岸线发生较大的变化,对鸟类栖息地造成很大的影响. 该区是流入青海湖主要河流—布哈河的入湖口. 图3显示了1973—2018年鸟岛湖岸线的变化过程. 2004年之前,随着青海湖水域的逐渐萎缩,布哈河入湖口逐渐向湖中心推进,同时也影响周边湖岸的变化,期间鸟岛岸线向湖内推进的最大距离为3.12 km,岸线变化对周围鸟类栖息环境影响较大. 2004年以来,随着青海湖水位上

升,岸线逐渐后退,至2018年后退最大距离为5.52 km,在研究时段内,相邻年间岸线最大变化距离出现在2017—2018年(为2.49 km)。2018年对青海湖进行实地考察时发现,因水位上涨,鸟岛保护区的码头、停车场和部分建筑物被湖水淹没或破坏。

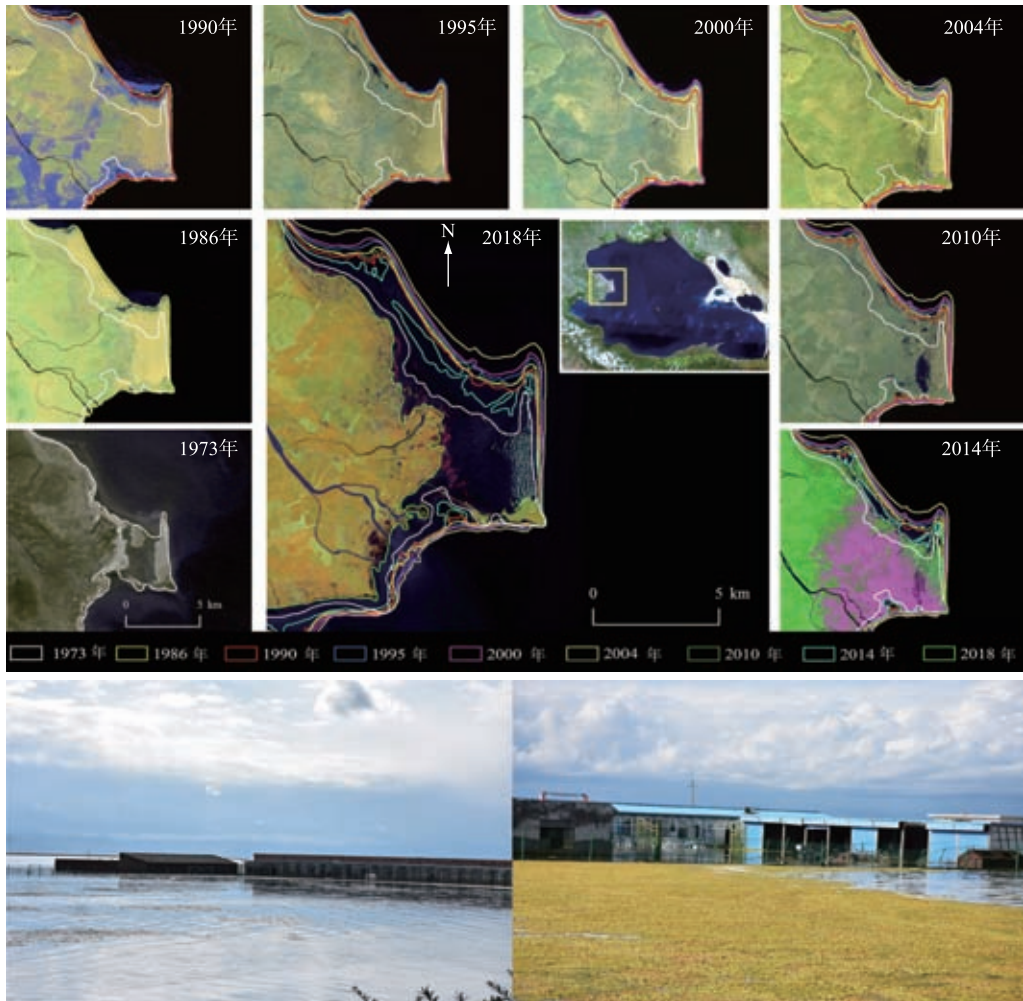


图3 鸟岛岸线的演变过程及附近被淹没的建筑

Fig.3 Evolution of Bird Island shoreline and submerged building

沙岛湖位于青海湖的东岸(图2),原属青海湖一部分。图4清楚地反映了1973—2018年间沙岛湖演变过程,从早期湖湾到逐渐被风沙和沉积物掩盖了南部与青海湖的通道而形成独立湖泊,又随着湖岸线前进,湖水重新淹没部分裸露区域使其与湖泊主体逐渐连通。沙岛湖岸为堆积湖岸,沉积物的堆积作用使沙质地表裸露区域越来越大,湖岸线逐渐后退,导致1973—1986年沙岛湖与青海湖主体脱离而形成独立的湖泊。1995年之后,由于湖区地表的蒸发以及缺少地表水的补给,沙岛湖逐渐萎缩^[20];2004年,随着青海湖水位回升与面积扩张,沙岛湖面积逐渐扩张,最终在2012年又与青海湖主体相连。在此期间,沙岛湖岸线向湖心缩进最大距离达4.11 km,平均每年缩进217 m,沙岛湖的东西向长度也由1973年的6714 m缩短为2004年的3716 m。2004—2018年,随着湖岸线后退,湖水重新淹没了部分裸露区域,与2004年相比,2018年岸线后退3.78 km,平均每年后退270 m,沙岛湖东西向长度也由2004年的3716 m扩张为2018年的6948 m。

铁布卡湾北部岸线也随青海湖面积变化出现前进或后退(图5)。受岸线区域砂质的影响,加之此处是

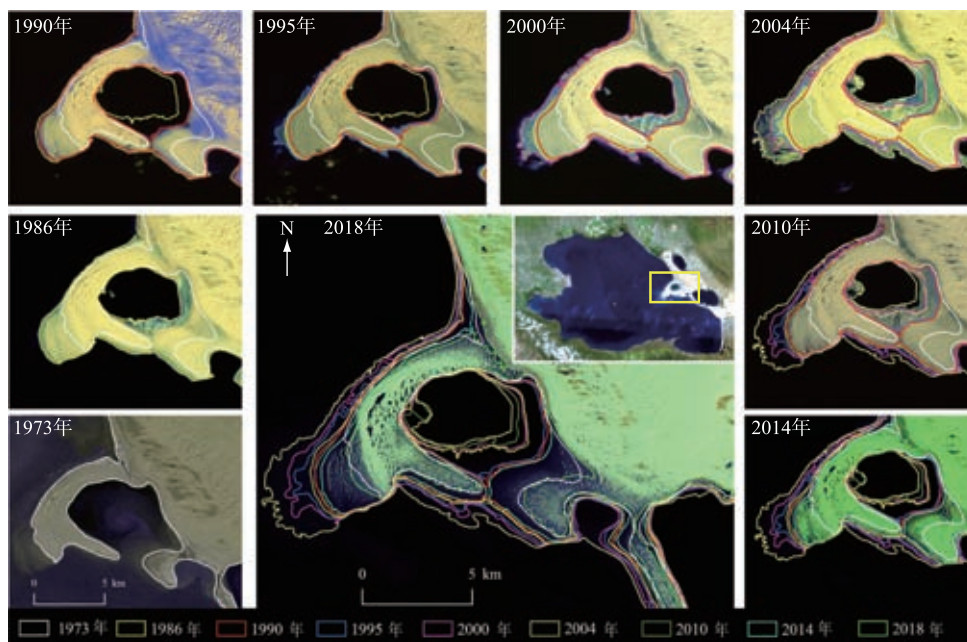


图4 沙岛湖岸线的演变过程(按照顺时针方向排列)

Fig.4 The evolution of Lake Shadiao shoreline (arranged in a clockwise direction)

弯道,湖水流速减慢,湖岸堆积速度较快,导致湖岸变化较大^[20]. 2004年之前,随着青海湖面积萎缩,岸线逐渐向湖中心推进,与1973年相比,2004年铁布卡湾北部岸线达到最大推进距离(为1.96 km),平均每年向湖中心推进60 m. 2004年之后,此处岸线随着湖泊面积的增加而后退,在2017年岸线与1973年几乎重合,直到2018年10月,由于青海湖流域降水量增大,青海湖水位上涨迅速,面积不断扩张,铁布卡湾北部岸线出现扩张,与1973年的岸线相距780 m. 2017—2018年是相邻年间岸线变化最大的年份,最大变化距离为740 m. 由于泉湾毗邻铁布卡湾,2018年因水位上涨湖岸线后退,泉湾附近大范围的草场被水淹没.

沙柳河位于青海湖的北岸(图2),是另一条流入青海湖的重要补给河,对青海湖的补给仅次于布哈河. 图6展示了1973—2018年沙柳河及周边地区湖岸线的演变过程. 沙柳河口的岸线变化也较明显. 与布哈河周边湖岸变化情况相似,由于河流的冲积以及地质构造作用,沙柳河入湖口两侧的湖岸变化较快,其中入湖口东侧湖湾处的湖岸变化非常明显. 1973—2004年,该河口岸线向湖中心推进了2.42 km,随后岸线随着面积扩张逐渐后退,与2004年相比,岸线后退最大距离是2.99 km,2017—2018年依然是岸线变化最大的年份,最大变化距离达1.72 km.

3.2 青海湖动态变化

3.2.1 青海湖面积变化 1973—2018年青海湖面积总体呈先减后增趋势. 其中,2004年面积减少至最小,比1973年减少209.67 km²(-4.76%). 根据青海湖水位实测数据,2004年亦是近45年水位最低的年份. 1986年面积出现骤减,比1973年减少113.20 km²,之后呈小幅度波动逐渐减少趋势;2004—2018年面积增加19.59 km²,2018年达到最大,比1973年和2004年分别增加54.47和274.26 km². 就面积变化幅度而言,1973—2004年期间面积相对于2004—2018年变化幅度较小,平均每年变化幅度为-6.38 km²,而2004—2018年间平均每年变化幅度为16.36 km².

3.2.2 青海湖水位变化 根据青海湖下社水文站实测水位数据发现,自1961年以来青海湖水位主要经历了下降和回升两个过程. 1961—2004年青海湖水位共下降3.22 m,倾向率达-0.8 m/10 a,平均水位为3194.40 m(图7a);2004年以后,青海湖水位以每年15 cm速率迅速回升,倾向率达1.5 m/10 a,至2017年由3192.86 m回升至3194.93 m,共上升2.07 m,平均水位为3193.80 m. 根据已有青海湖水位实测数据和基于Landsat遥

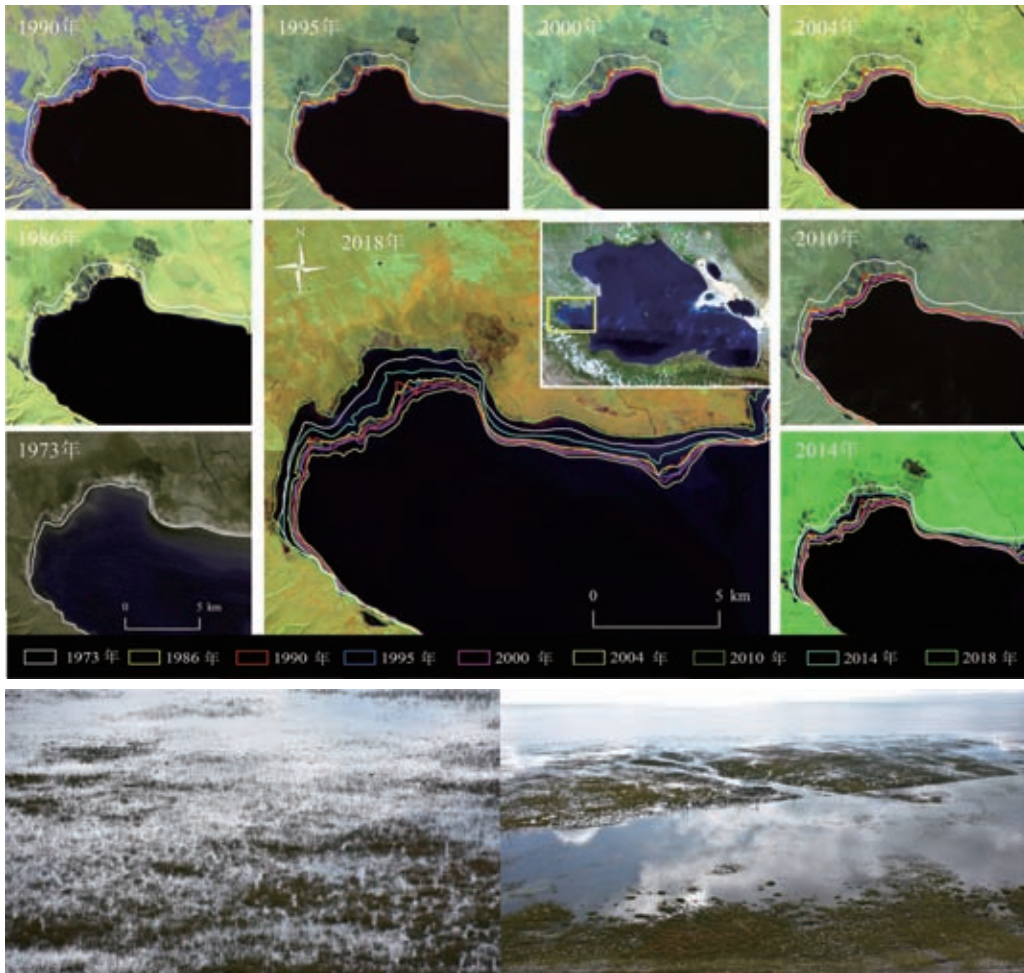


图5 铁布卡湾岸线的演变过程及被淹没的草场

Fig.5 The evolution of Tiebuka Bay shoreline and submerged pasture

感影像提取的面积数据,构建青海湖水位和面积的拟合方程.如图7b所示,青海湖水位和面积相关性达0.96,这与已有研究基本一致^[21].基于本文构建的水位—面积拟合方程及已有的水位实测数据,推算出1961—1987年的青海湖水面面积(该时段影像缺失),与Landsat遥感影像提取面积相比,平均相对误差仅为0.25%,表明可基于推算的面积数据估算青海湖水量变化.

3.2.3 青海湖水量变化 1961—2017年青海湖水量平衡为负平衡,观测时段内水量减少 1.08 km^3 ,平均减少速率为 $0.02 \text{ km}^3/\text{a}$.1961—2004年为青海湖水位下降期,水量减少 13.24 km^3 ,变化率为 $-0.3 \text{ km}^3/\text{a}$,其中仅有9年水量增加,其余年份水量均略有减少,且其水量变化呈上下波动状态,无明显减少趋势.相邻年间水量变化最大分别是1967—1968年(-2.29 km^3)和1987—1988年(-1.89 km^3).2004年后水量迅速回升,总体呈明显增加趋势,尤其2015年后这种趋势更加显著,至2017年水量以 $0.15 \text{ km}^3/\text{a}$ 的速率共增加 12.16 km^3 .

与已有研究结果相比,本文结果变化趋势相同,但也存在个别差异.如骆成凤等^[3]和Tang等^[22]均基于Landsat遥感影像提取青海湖面积,除本身遥感解译存在误差外,由于投影方式不同等造成个别年份面积存在差异,但总体变化趋势及速率在相同时段内与本文结果基本一致.时兴合等^[23]、Zhu等^[24]和张国庆等^[21]分别基于实测和ICESat数据估算青海湖水量,其变化趋势均与本研究基本一致.由于选用估算水量平衡公

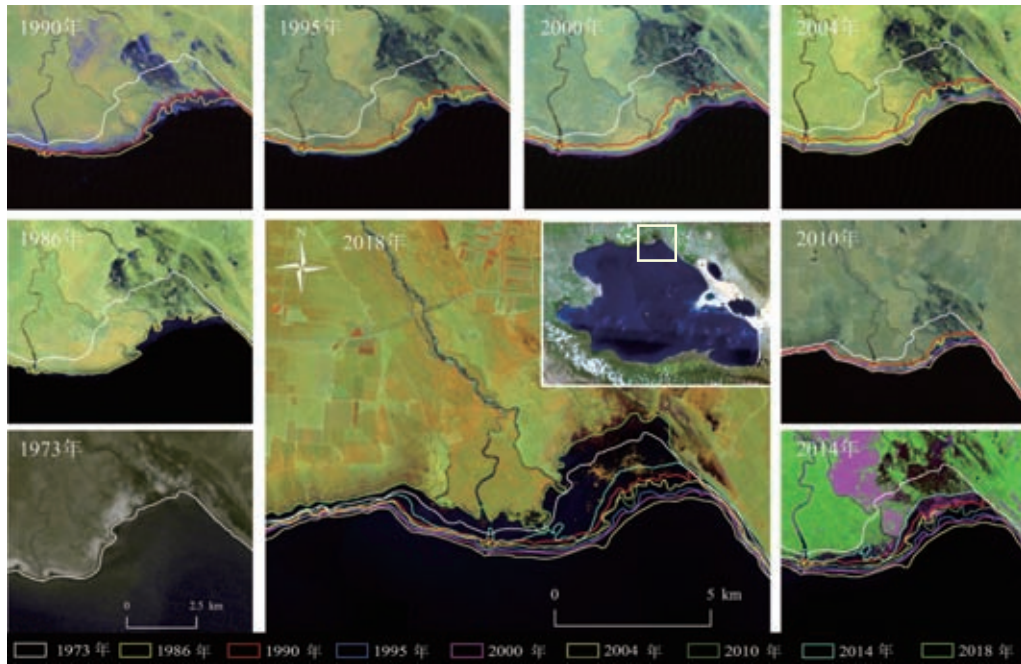


图 6 沙柳河岸线的演变过程
Fig.6 The evolution of Shaliu River shoreline

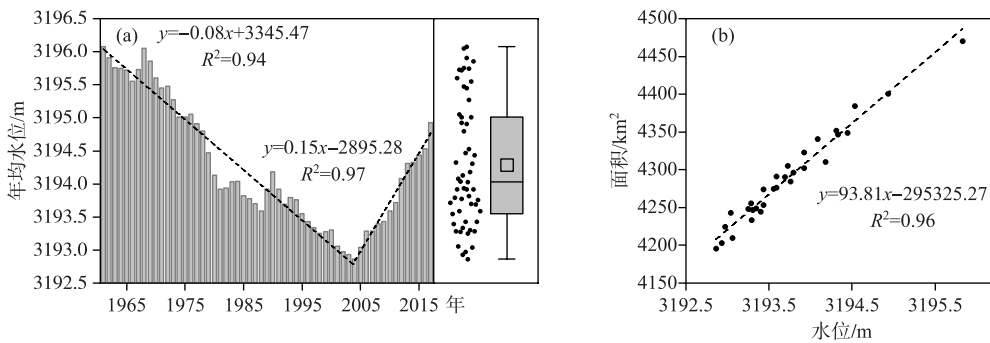


图 7 1961—2017 年青海湖水位变化及水位—面积拟合关系

Fig.7 The water level variations of Lake Qinghai from 1961 to 2017 and relationship between water level and area

式及数据精度不同,仅造成水量年均变化速率与本文结果略有不同.

3.3 青海湖动态变化对岸线曲折性的影响

湖泊面积在空间上的变化特征与湖泊的地理位置、地形特征等密切相关^[25]. 借鉴几何学上的象限方位分析方法^[26],探究不同时段内青海湖面积变化的空间差异对岸线变迁造成的影响. 结果如图 8a 所示,萎缩期面积共减少 209.67 km²,主要以正东方向为主导,正西及西北方位萎缩也较为明显,这直接导致位于湖区东部的沙岛湖岸线向湖中心推进约 4.11 km,水域面积萎缩约 80.95 km²;正西方位鸟岛地区岸线推进 3.12 km,鸟类栖息地范围减少约 31.69 km²,铁布卡湾和沙柳河岸线也向湖心推进约 2 km. 扩张期青海湖面积共增加了 274.26 km²(图 8b),其中在正东扩张面积最大、正西及西北方位扩张也很明显,同期鸟岛地区岸线变化最大,随着面积扩张岸线后退了 5.52 km,尤其在 2017 年后退速率骤增,鸟类栖息地扩张约 97.94 km². 从

整体来看,青海湖主要在正西、正东和西北方向面积扩张较大(图8c),其中正西方向面积变化最大,平均每年扩张 0.53 km^2 ,除东北方向面积呈萎缩趋势外,其余方向均出现不同程度的扩张,湖泊岸线的扩张方向也跟面积在空间上的变化规律一致.湖泊几何中心迁移可以反映湖泊面积、湖底地形和湖底沉积的动态变化^[21],尤其是湖泊面积变化与几何中心迁移密切相关^[22].分别计算湖泊萎缩期和扩张期各年份几何中心经纬度,提取移轨迹(图8d),这与青海湖在各方向上的面积变化趋势基本一致,也为湖泊面积在空间上的变化和四个区域岸线变化趋势提供了一种佐证.

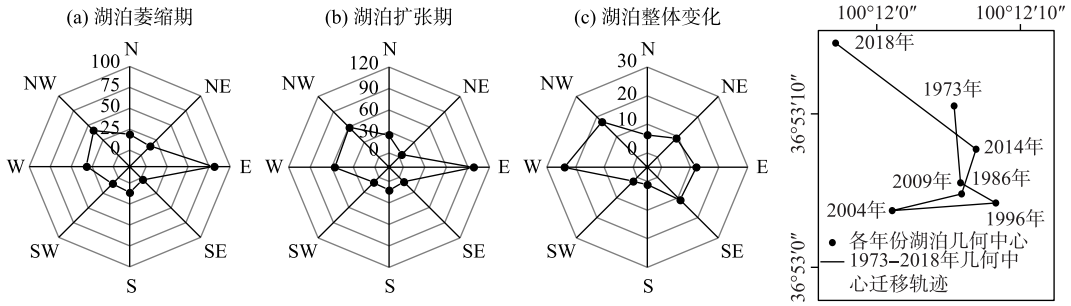


图8 不同时段内青海湖各方位的面积变化及几何中心迁移轨迹

Fig.8 Variation in area of Lake Qinghai in each direction and moving track of geometric center in different periods

湖泊的岸线长度是表征湖泊形态特性的一项重要指标,反映了湖泊及流域地质、地貌、水文等各种内、外力相互作用的强度和发展过程,并随着湖泊的演变过程呈现动态变化^[6].近45年来青海湖岸线长度以 0.88 km/a 的速率逐渐延长,1997年之前岸线长度呈较为平稳的上升趋势,1997—2004年呈波动下降趋势,2004年之后呈剧烈波动增加趋势.图9是1973—2018年青海湖水位(图9a)和面积(图9b)与岸线长度的对比关系.从总体变化趋势来看,水位和面积均与岸线长度呈正相关关系,相关性并不显著(相关系数分别为0.14和0.19),说明青海湖岸线长度受水位和面积的影响并不明显,可能受其他因素如地形等影响更大.但从不同的时段来看,尤其在1997年之前,尽管水位在下降,面积减少,但岸线长度一直呈增加趋势,这表明当青海湖水位大于 3193.3 m 或面积大于 4249.3 km^2 时,岸线长度随着水位的下降逐渐增加.1997—2007年青海湖水位、面积和岸线长度的变化趋势一致.2007年之后,当水位大于 3193.3 m 或面积大于 4249.3 km^2 时,岸线长度随着水位上升不断增加,年际变化较大.

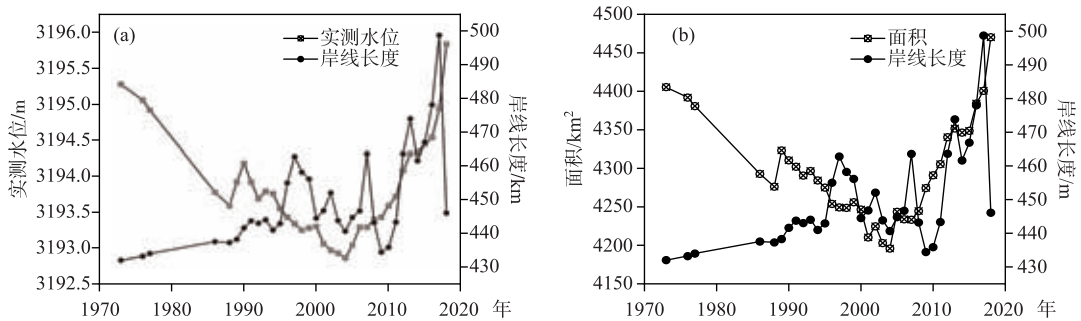


图9 1973—2018年青海湖水位(a)和面积(b)与岸线长度的对比关系

Fig.9 Comparison of water level(a) and area(b) with shore line length of Lake Qinghai from 1973 to 2018

湖岸线发育系数意义在于它反映了沿岸带群落在整个湖泊容积中占有更大比例的潜在能力.作为常用的湖泊几何形态学指标,其值愈大表示岸线愈不规则,相对能够提供的沿岸带生物多样性越高^[7],相应的沿岸带面积也较大,这就有可能支持更高的湖泊初级生产力.由图10a可知,1973—2018年青海湖岸线发育系数呈逐渐增大趋势,和岸线长度变化趋势基本一致,表明岸线的曲折性在不断增大.岸线发育系数与岸线长

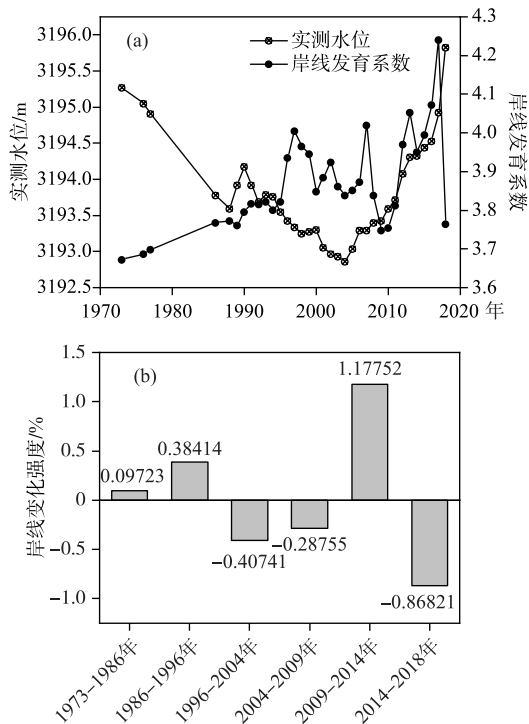


图 10 1973—2018 年青海湖岸线发育系数 (a) 和岸线变化强度 (b)

Fig. 10 The shoreline development index (a) and shoreline change intensity (b) of Lake Qinghai from 1973 to 2018

湖岸, 湖流改造和沙漠化促进了湖岸线形态发生变化, 沉积物的堆积作用导致 1973—1986 年沙岛湖与青海湖主体脱离而形成独立的湖泊。加之 1995 年之后, 由于湖区地表的蒸发缺少地表水的补给, 沙岛湖逐渐萎缩^[20]; 此外, 青海湖周边分布有广泛的冲洪积物、冲积物、湖积物等松散沙质堆积物, 且入湖河流也可能携带不少泥沙, 加之湖区盛行西北风等使得自然生态环境较为脆弱, 导致了沙质荒漠化土地范围明显扩大且速度加快, 不仅表现为东南部沙质荒漠化土地向南和向北扩张, 而且泥沙淤积增加和湖水位下降导致东南部的沙质荒漠化土地逐渐向西部水体扩张, 同时在布哈河入湖处的北部形成了沿湖滨分布的弧形沙质荒漠化土地带^[27]。伴随着土地沙漠化, 青海湖周围地区的草地也出现较为严重的退化现象, 此外, 人类活动 (如湖周耕地及不合理利用草地) 间接导致沙漠化发展^[28]。如湖北岸冲积扇上的耕地, 由于地形的原因, 水土流失严重, 导致湖岸淤积岸线向湖中心推进。因此推断 1973—2004 年间湖水位下降和土地沙漠化是造成湖岸变化的直接成因, 人类活动及草场退化加速了湖泊岸线的变迁。随着青海湖的萎缩及生态环境的恶化, 引起了人们的高度重视, 开始对青海湖转变发展模式, 施行生态管理。2004 年之后, 随着青海湖水位回升与面积扩张, 岸线逐渐后退, 至 2018 年后退最大距离为 5.52 km (鸟岛区域)。沙岛湖面积逐渐扩张, 最终在 2012 年又与青海湖主体相连。

4.2 水量变化影响因素

青海湖地处东亚季风区、印度夏季季风和西风急流交汇处, 其动态变化与气候和环境演变密切相关。已有研究表明, 冰川融水对青海湖水量贡献甚微^[29], 人类活动对其水量变化的影响也较小^[27]。作为封闭型内陆湖, 降水、蒸发和径流比其他自然因素更直接地影响青海湖水量平衡。在人为因素影响不显著的情况下,

度和湖泊面积直接相关, 1997 年之前岸线发育系数不断增大主要是由于在此期间面积不断减小, 岸线长度不断增大, 因此在二者比值的情况下 *SDI* 值才会逐渐增大。1997—2007 年岸线发育系数有一个较小的波动, 说明当水位保持在一定范围内, 水位变化对面积和岸线长度的影响都比较大, 在此期间岸线发育系数与水位变化趋势一致。2007 年之后岸线发育系数呈现剧烈波动式的上升状态, 说明随着水位上升湖泊面积的增大, 岸线曲折性呈现较大的年际变化, 这与岸线长度的变化趋势一致。为进一步对比各时段湖岸线长度变化速度, 采用某一时间段内湖岸线长度的年均变化百分比来表示湖岸线的变化强度^[26]。湖岸线变化强度为正表示湖岸线长度延长, 为负则表示缩短。统计 6 个时段内湖岸线的变化强度 (图 10b), 2009—2014 年变化强度最大 (达 1.18%), 这与湖岸线长度在此期间不稳定延长变化趋势基本一致。2014—2018 年青海湖岸线以 0.87% 的强度缩短, 变化强度仅次于 1996—2004 年。1973—1986 岸线年变化强度最小, 为 0.10%。

4 讨论

4.1 湖岸线变迁影响因素

近 45 年来青海湖岸线发生了较大的变迁, 1973—2004 年间, 青海湖水位的下降和面积的缩小, 为湖岸沙漠化的发展提供了物源和场地, 从而使得湖泊岸线向湖中心推进, 如沙岛湖岸线向湖心缩进最大距离达 4.11 km。这主要是由于沙岛湖岸为堆积

降水量、入湖径流量和蒸发量决定其水位波动,为进一步探讨青海湖水量变化的影响因素,本文利用入湖径流量、降水量及湖面蒸发量等数据分析其变化原因。

青海湖周边 11 个自动气象站(表 1)仅可获取 2015—2017 年气象资料,受数据时段限制无法提供对应研究时段的气温和降水数据,且没有对蒸发量进行监测。尽管如此,该数据可用于验证距青海湖最近的气象站点(刚察、共和)数据是否可直接用于评估降水、蒸发等对水量变化的贡献(亏损)。如图 11 所示,计算自动气象站获取的月气温和降水数据平均值,分别与刚察及共和站点数据的平均值做拟合分析,与降水数据相比,气温表现出非常高的一致性($R^2=0.99$)(图 11a),而气温又是影响蒸发的主控因素,从而间接表明基于站点蒸发数据估算湖面蒸发量准确性较高。由于青海湖独特的地理位置和较大的水面范围导致湖区降水并不均匀,从而造成站点降水和自动气象站降水数据不具备非常高的一致性(图 11b),站点降水月均数据比自动气象站数据偏高约 11%,总体上二者变化趋势基本一致,这也说明在数据有限的情况下,站点降水数据也可用来评估其对水量的贡献。

表 1 青海湖周边自动气象站信息

Tab.1 Automatic weather station information around Lake Qinghai

站名	区站号	经度(E)	纬度(N)	测站海拔/m	型号	供电方式
倒淌河	X3001	100°58'19"	36°24'17"	3283	ZQZ-A	太阳能
铁卜加	X3002	99°35'56"	36°59'46"	3211	ZQZ-A	太阳能
黑马河	X3003	99°45'46"	36°43'59"	3205	ZQZ-A	太阳能
湖东	X3004	100°48'50"	36°38'12"	3296	ZQZ-A	太阳能
鸟岛	X4001	99°52'24"	36°58'44"	3195	ZQZ-A	太阳能
金滩	X4002	101°05'48"	36°49'32"	2961	ZQZ-A	太阳能
甘子河	X4003	100°40'51"	36°59'19"	3280	ZQZ-A	太阳能
泉吉	X4004	99°51'29"	37°15'40"	3229	ZQZ-A	太阳能
刚察	52754	100°08'16"	37°19'50"	3302	DZZ4	太阳能
海晏	52842	100°59'22"	36°54'20"	3010	DZZ4	太阳能
江西沟镇	52851	100°16'25"	36°36'57"	3241	ZQZ-BH	太阳能

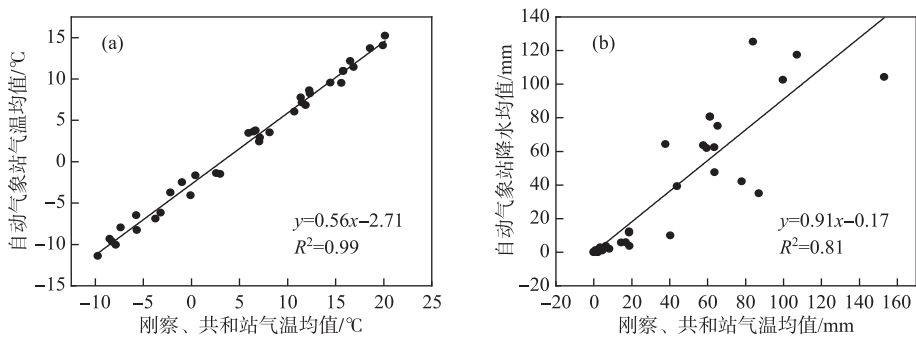


图 11 气温(a)和降水(b)数据的对比

Fig.11 Comparison of temperature (a) and precipitation (b) data

青海湖补给主要来源于入湖径流和降水量。在青海湖的补给河流中,流域面积大于 300 km²的干支流有 16 条,其中,分布于流域西北部的布哈河和沙柳河是径流量最大的 2 条河流,其流量总和占青海湖流域入湖总流量的 73% 以上,尤其是布哈河的径流主导着青海湖水量变化^[30]。本文根据实测径流量数据(1974—2015 年),将其与对应时段的水量变化做相关性分析,在 0.01 置信水平下二者表现出显著正相关($R^2=0.79$),根据径流量—水量变化的拟合方程估算出没有实测数据年份的径流量,将研究时段分为水位下降期和上升期分析自然因素对其影响程度。在青海湖水位下降期(图 12a),湖面蒸发量呈略减趋势(-0.097 mm/

a), 入湖河流年径流量以每年 0.103 km^3 的速率减少, 至 2004 年径流量减少量占水量减少量的 33%. 尽管期间降水量呈略增趋势 (0.001 mm/a), 但远不能弥补径流量减少直接造成的青海湖水量减少, 水位下降. 因此, 在此期间, 影响青海湖水量平衡的主要因素是入湖径流量; 与水位下降期相比, 水位上升期 (图 12b) 布哈河和沙柳河的年总增加径流量占水量增加量的 8%. 同时, 降水量以 4.99 mm/a 的速率增加, 湖面蒸发量以 5.868 mm/a 的速率减少, 尽管湖区蒸发量较大, 但青海湖蒸发量主要受大风天气频率、强度和持续时间控制^[31], 此外还受湿度、温度、太阳辐射等气象因子的综合影响. 因此, 蒸发对青海湖地区的影响有限. 在径流量和降水增加、蒸发量减少的自然条件下青海湖水量迅速增加. 从整个研究时段来看, 在年蒸发量逐渐减少的背景下, 2005 年入湖径流量和降水量年均变化均比 2004 年之前的平均值分别高出 51% 和 16%. 自动气象站数据表明 2015—2017 年间年降水量平均值比 1961—2014 年间均值高出 25.75 mm , 因此可推断 2015 年以来降水量和径流量骤增是直接导致青海湖面积迅速扩张的关键要素.

青海湖位于全球气候变化的重要响应区, 气温总体变化呈上升趋势. 气温的升高除促进湖面蒸发影响水量平衡之外, 也会驱动雪线的变化, 从而通过补给地表径流增加湖泊水量平衡中的收入项. Tang 等^[22] 研究表明, 祁连山主峰—岗什卡雪峰在 1995—2005 年期间雪线高度由 4342.2 m 降至 4326.9 m , 然而, 2006—2016 年由于积雪消融雪线从 4360.2 m 升至 4385.3 m . 王欢等^[32] 研究发现布哈河流域近 5 年冰雪覆盖面积缩小迅速, 补给青海湖的径流量呈显著的上升趋势, 且冻土及冰雪融化对径流影响达 75%. 表明青海湖流域正向暖湿化发展. 因此, 青海湖水量变化应归因于综合的气候变量.

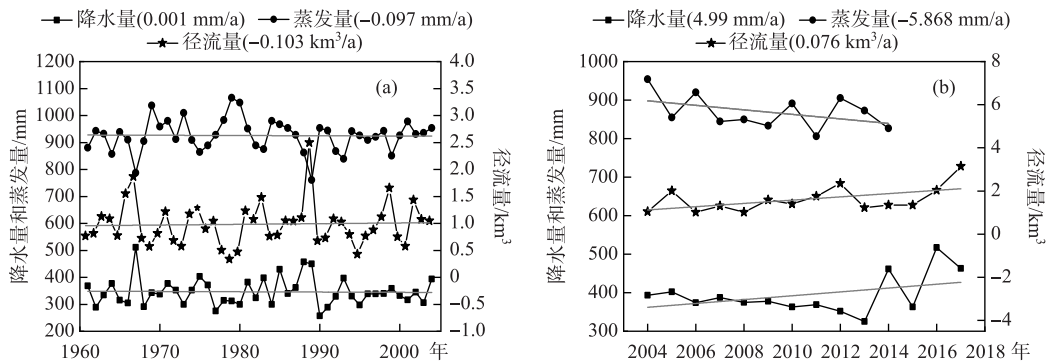


图 12 青海湖水位下降期(a)和上升期(b)降水、蒸发及径流量的变化

Fig.12 Changes in precipitation, evaporation and runoff during the water level fall (a) and rise (b) periods of Lake Qinghai

5 结论

本文基于 Landsat 遥感数据和气象资料, 综合运用 RS 和 GIS 技术, 对青海湖岸线动态变化及其对鸟类栖息地的影响进行研究, 同时结合面积、水位和气象数据讨论影响青海湖岸线变化的因素, 以期为政府部门加强湖岸带的资源监管和治理工作提供决策支持与依据. 主要结论如下:

1) 近 45 年来青海湖岸线发生变化最大的区域是东岸的沙岛, 西岸的鸟岛、铁布卡湾及北岸沙柳河入口区域. 尤其自 2004 年以来, 鸟岛地区岸线后退距离最大 (5.52 km), 淹没范围约 97.94 km^2 , 对周围鸟类栖息地影响较大.

2) 1973—2018 年青海湖岸线长度以 0.88 km/a 的速率逐渐延长. 1997 年之前岸线长度呈较为平稳的上升趋势, 1997—2004 年呈波动趋势下降, 2004 年之后呈剧烈波动趋势增加. 岸线曲折性也表现出相同的变化趋势.

3) 总体上岸线长度和曲折性受水位和面积的影响并不显著, 但在不同的水位情况下, 二者对青海湖动态变化做出不同的响应. 尤其当水位小于 3193.3 m 或面积小于 4249.3 km^2 时, 岸线曲折性会随着水位和面积变化呈现相同的变化趋势, 而水位高于 3193.3 m 时, 岸线曲折性一直在增加, 且水位上升速率越大则曲折

性年际变化较大。

4) 1973—2004年间青海湖水位下降和土地沙漠化是造成湖岸变化的直接成因,人类活动及草场退化加速了湖泊岸线的变迁。2004年之后,随着青海湖水位回升与面积扩张,岸线逐渐后退,尤其在2017—2018年岸线后退距离最大。

6 参考文献

- [1] Ding YJ, Liu SY, Ye BS *et al.* Climatic implications on variations of lakes in the cold and arid regions of China during the recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(5): 623-632. [丁永建, 刘时银, 叶柏生等. 近50年中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析. 冰川冻土, 2006, **28**(5): 623-632.]
- [2] Hu DS. Investigation and study on lake resources in Kekexili Region. *Arid Land Geography*, 1992, **15**(3): 50-58. [胡东生. 可可西里地区湖泊资源调查研究. 干旱区地理, 1992, **15**(3): 50-58.]
- [3] Luo CF, Xu CJ, Cao YX *et al.* Monitoring of water surface area in lake Qinghai from 1974 to 2016. *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1245-1253. DOI: 10.18307/2017.0523. [骆成凤, 许长军, 曹银璇等. 1974—2016年青海湖水面面积变化遥感监测. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1245-1253.]
- [4] Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences ed. Comprehensive survey report of Qinghai Lake. Beijing: Science Press, 1979. [中国科学院兰州地质研究院. 青海湖综合考察报告. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [5] Fan JH, Shi YF. Analysis of the influence of climate change on water condition of Qinghai Lake in recent 30 years. *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.]
- [6] Li XG, Jiang N, Wang HJ *et al.* Dynamic changes of lake shorelines morphology in the Taihu Basin during the past 30 years. *J Lake Sci*, 2005, **17**(4): 294-298. DOI: 10.18307/2005.0402. [李新国, 江南, 王红娟等. 近30年来太湖流域湖泊岸线形态动态变化. 湖泊科学, 2005, **17**(4): 294-298.]
- [7] Pan WB, Li DF, Tang T *et al.* The fractal character of lake shoreline and its ecological implication. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(12): 2728-2734. [潘文斌, 黎道丰, 唐涛等. 湖泊岸线分形特征及其生态学意义. 生态学报, 2003, **23**(12): 2728-2734.]
- [8] Liu X, Zhang WH, Li YH *et al.* Planning and restoration of bird habitats in a wetland park: a case study of the Liuli River wetland park in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(12): 4404-4411. [刘旭, 张文慧, 李咏红等. 湿地公园鸟类栖息地营建研究—以北京琉璃河湿地公园为例. 生态学报, 2018, **38**(12): 4404-4411.]
- [9] Cheng NY, Zhang W, Zhang TW *et al.* eds. Wetland park design. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. [成玉宁, 张祎, 张亚伟等. 湿地公园设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.]
- [10] Bi JP, Zhang L, Song QQ *et al.* ed. Coastline dataset of Hainan Island during 1987—2017. *Science Data Bank*, 2019, **4**(2). (2019-01-03). DOI: 10.11922/csdata.2018.0066.zh. [毕京鹏, 张丽, 宋茜茜等. 1987—2017年海南岛海岸线数据集. 中国科学数据, 2019, **4**(2). (2019-01-03).]
- [11] Water Resources Department of Qinghai Province, Bureau of Statistics of Qinghai Province. The First Water Resources Survey Communique 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.]
- [12] Chen XM, Hai B, Wang LL *et al.* Analysis on the correlation between total phosphorus, water temperature, mineralization and chlorophylla in Qinghai Lake, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(2): 333-337. [陈学民, 韩冰, 王莉莉等. 青海湖总磷、水温及矿化度与叶绿素a相关性分析. 农业环境科学学报, 2013, **32**(2): 333-337.]
- [13] Qi MM, Yao XJ, Li XF *et al.* Spatial-temporal characteristics of ice phenology of Qinghai Lake from 2000 to 2016. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(5): 932-944. [祁苗苗, 姚晓军, 李晓锋等. 2000—2016年青海湖湖冰物候特征变化. 地理学报, 2018, **73**(5): 932-944.]
- [14] Li JL, Chen X, Bao AM. Spatial-temporal characteristics of lake level changes in Central Asia during 2003—2009. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(9): 1219-1229. [李均力, 陈曦, 包安明. 2003—2009年中亚地区湖泊水位变化的时空特征. 地理学报, 2011, **66**(9): 1219-1229.]
- [15] Luo JH, Sheng YW, Shen ZF *et al.* Multi-spectral remote sensing water information extraction with high precision. *Journal of Remote Sensing*, 2009, **13**(4): 610-615. [骆剑承, 盛永伟, 沈占锋等. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度

- 自动提取. 遥感学报, 2009, **13**(4): 610-615.]
- [16] McFeeters S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(7): 1425-1432.
- [17] Song C, Huang B, Ke L. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **135**(Complete): 25-35.
- [18] Wang HJ, Jiang JH, Li XG. Study on changes of lake shoreline morphology in Daihai Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, **15**(5): 674-676. [王红娟, 姜加虎, 李新国. 岱海湖泊岸线形态变化研究. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(5): 674-676.]
- [19] Guan ZH ed. Morphological parameters of Baoan Lake and its significance in limnology. Beijing: Science Press, 1995. [官子和. 保安湖形态测量学参数及其在湖沼学上的意义. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [20] Feng ZK, Li XH. 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.]
- [21] Zhang GQ, Xie HJ, Yao TD *et al.* Estimation of water balance of the ten largest lakes in China based on ICESat and Landsat. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(26): 2664-2678. [张国庆, Xie Hongjie, 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.]
- [22] Tang L, Duan X, Kong F *et al.* Influences of climate change on area variation of Qinghai Lake on Qinghai-Tibetan Plateau since 1980s. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 7331.
- [23] Shi XH, Li YY, Li SC *et al.* Calculation and change of water balance in Qinghai Lake. *Qinghai Meteorological*, 2008, (s1): 74-81. [时兴合, 李应业, 李生辰等. 青海湖水量平衡各分量的计算及变化. 青海气象, 2008, (s1): 74-81.]
- [24] Zhu WB, Jia SF, Lv AF. Monitoring the fluctuation of Lake Qinghai using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing*, 2014, **6**(11): 10457-10482.
- [25] Wan W, Xiao PF, Feng XZ *et al.* Remote sensing analysis for change of lakes in the southeast of Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau in recent 30 years. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 874-881. DOI: 10.18307/2010.0609. [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**(6): 874-881.]
- [26] Xu N, Gao ZQ, Ning JC. Spatial-temporal variations of coastlines in Bohai Rim based on fractal dimension and their causes analysis. *Journal of Marine Sciences*, 2016, **34**(1): 45-51. [许宁, 高志强, 宁吉才. 基于分形维数的环渤海地区海岸线变迁及成因分析. 海洋学研究, 2016, **34**(1): 45-51.]
- [27] Li Y, Duan SQ, Jin YM. Analysis of features and causes of Qinghai Lake during the period of 1956-2001. *Yellow River*, 2014, **36**(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, **36**(6): 87-89.]
- [28] Li FX, Li L, Sheng F *et al.* Evolution of lakeshore shape of Qinghai Lake and its causes. *Resources 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.]
- [29] Jin ZD, Zhang F, Wang LH *et al.* The reasons of rising water level in Lake Qinghai since 2005. *Journal of Earth Environment*, 2013, **4**(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, **4**(3): 1355-1362.]
- [30] Zhang GQ. Water level variation of Lake Qinghai from satellite and in situ measurements under climate change. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2011, **5**(1): 053532.
- [31] Li XY, Ma YJ, Huang YM *et al.* Evaporation and surface energy budget over the largest high-altitude saline lake on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016.
- [32] Wang H, Liu JF, Xie ZY *et al.* Application of 3D design platform in reservoir capacity evaluation. *Water Resources and Power*, 2018, **36**(8): 18-22. [王欢, 刘九夫, 谢自银等. 青海湖流域径流变化趋势及归因分析. 水电能源科学, 2018, **36**(8): 18-22.]