

## 2004 年以来青海湖快速扩张对人居设施与草地的潜在影响<sup>\*</sup>

程 俭<sup>1,2</sup>, 刘昌华<sup>1</sup>, 刘 凯<sup>2</sup>, 武建双<sup>3</sup>, 范晨雨<sup>1,2</sup>, 薛 滨<sup>2</sup>, 马荣华<sup>2</sup>, 宋春桥<sup>2\*\*</sup>

(1: 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室, 南京 210008)

(3: 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 作为我国最大的内陆咸水湖, 青海湖是青藏高原东北部重要水汽源, 在维持区域生态环境及半干旱生态系统功能方面发挥着重要作用. 近年来, 青海湖水位迅速上升, 但是湖泊扩张对周边人居设施与草地的影响尚未得到广泛关注和报道. 基于 1995—2019 年 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像、Hydroweb 多源测高同化水位数据、SRTM-1 DEM 数据等, 本研究以青海湖近年来增长率情景开展湖泊快速扩张对周边人居设施(道路、居民点)与草地影响和潜在威胁的定量研究. 结果表明, 1995—2004 年期间青海湖处于萎缩态势, 2004 年水位和面积出现最小值, 之后, 青海湖进入稳定扩张期. 2004—2019 年期间, 青海湖水位累计上涨 3.27 m, 年均增长率约为 0.22 m/a; 相应地, 青海湖水量增长了 14.25 km<sup>3</sup>, 年均增长率为 0.95 km<sup>3</sup>/a. 湖泊扩张模拟结果显示, 若青海湖水量以当前速率增长, 水位将在 2070 年前后达到 3207 m(相对 2019 年约 10 m 的水位涨幅), 届时将会淹没 178 个居民点、长度约为 1286.91 km 的道路以及 2042.22 km<sup>2</sup> 的植被, 其中预测的高风险区域主要为切吉乡、泉吉乡和金滩乡. 该研究有望为青海湖快速扩张对当地居民的影响和潜在威胁提供重要的科学参考, 并在气候变化背景下为制定缓解气候变化风险的预案提供科学依据.

**关键词:** 青藏高原; 气候变化; 青海湖; 水位; 道路; 居民点; 草地

## Potential impact of the dramatical expansion of Lake Qinghai on the habitat facilities and grassland since 2004<sup>\*</sup>

Cheng Jian<sup>1,2</sup>, Liu Changhua<sup>1</sup>, Liu Kai<sup>2</sup>, Wu Jianshuang<sup>3</sup>, Fan Chenyu<sup>1,2</sup>, Xue Bin<sup>2</sup>, Ma Ronghua<sup>2</sup> & Song Chunqiao<sup>2\*\*</sup>

(1: College of Surveying and Geotechnical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China)

**Abstract:** As China's largest inland saline lake, Lake Qinghai is an important source of water vapor in the northeast of the Tibetan Plateau, and plays an important role in the regional ecological environment and sustaining the semi-arid ecosystem function. In recent years, the water level of Lake Qinghai has risen rapidly, but the impact of lake expansion on the habitat facilities and grassland has not received widespread attention and reports. Based on Landsat TM/ETM+/OLI images from 1995 to 2019, Hydroweb multi-source altimetry measurements, and SRTM-1 DEM data, etc., this study aims to analyze the influence and potential threat of the lake rapid expansion on the habitat facilities (roads, settlements) and grassland by referring to the growth rate of Lake Qinghai in recent years. The results show that during the period of 1995–2004, Lake Qinghai was in a state of shrinkage, and the water level and area in 2004 was at the minimum. After 2004, Lake Qinghai entered a period of stable expansion. From 2004 to 2019, the

<sup>\*</sup> 2020-07-28 收稿; 2020-09-12 收修改稿.

第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0202)、国家重点研发计划项目(2019YFA0607101, 2018YFD0900804, 2018YFD1100101)、国家“引进项目”青年项目(Y7QR011001)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA23100102)和国家自然科学基金项目(41971403, 41801321)联合资助.

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: cqsong@niglas.ac.cn.

water level of Lake Qinghai has increased by 3.27 m, and the annual increase rate is about 0.22 m/a; accordingly, the water storage has increased by  $14.25 \text{ km}^3$ , with an average annual growth rate of  $0.95 \text{ km}^3/\text{a}$ . Lake expansion simulation results show that the water level of Lake Qinghai will reach about 3207 m around 2070 at the current rising rate of water storage (relative to the water level increase of about 10 meters in 2019), at that time, 178 settlements, about 1286.91 km of roads and  $2042.22 \text{ km}^2$  of vegetation will be submerged, among which the predicted high-risk areas are mainly located in Qieji Township, QuANJI Township, and Jintan Township. The study is expected to provide important scientific support for anticipating the impact and potential threats of the rapid expansion of Lake Qinghai on local residents, and to provide a scientific basis for formulating plans to mitigate climate change risks in the context of climate change.

**Keywords:** Tibetan Plateau; climate change; Lake Qinghai; water level; road; settlement; grassland

湖泊是全球水文和生态过程的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>,为人类提供了不可或缺的资源和服务,包括饮用水供应、农业生产、交通、娱乐和渔业等<sup>[4-5]</sup>. 青藏高原广泛分布着冰川、冻土、积雪、湖泊和湿地,对维持区域水循环起着至关重要的作用<sup>[6-9]</sup>,是全球变化敏感区和亚洲生态安全屏障<sup>[10]</sup>. 高原湖泊受人类活动影响较小,是区域气候与环境的敏感指示器. 近年来,在气候变化背景下大多数高原湖泊呈现明显扩张趋势,表现为湖面扩大、水位上升和水量增加<sup>[11-18]</sup>. 监测和预测湖泊动态对于评估区域水资源可用性,理解气候与水文变化,以及制定可持续的管理计划至关重要.

作为我国最大的内陆咸水湖,青海湖位于青藏高原东北部东亚季风,印度季风和西风急流的交汇处<sup>[19-21]</sup>,对气候变化敏感而强烈,在维持区域水循环中起着至关重要的作用<sup>[22]</sup>. 国内外大多数研究都集中在调查青海湖的动态变化特征和探讨湖泊变化的驱动因素上<sup>[20,23-29]</sup>. 研究表明,在 20 世纪后期青海湖明显萎缩,但 21 世纪初以来快速扩张<sup>[20,30-32]</sup>. 事实上,湖泊强烈萎缩或者扩张可能对水文和大气过程<sup>[33-34]</sup>有显著反馈作用,并会对人类生活环境产生重大影响<sup>[35-39]</sup>. 陈阿江等<sup>[35]</sup>的研究结果表明,近年来色林错水位不断上升,导致周边大量的优质草场被淹没,对当地牧民的生活造成了严重影响. 杜玉娥等<sup>[36]</sup>利用多源卫星资料分析了盐湖的动态变化,并分析了盐湖扩张对周边草地生态环境及重大工程设施产生的不利影响. 刘宝康等<sup>[37]</sup>研究发现,卓乃湖的溃堤直接导致湖岸线退缩,从而产生大片的沙化土地,进一步恶化了藏羚羊的产仔环境. 然而,目前对于青海湖不断扩张对当地生活环境的影响研究,却鲜有报道.

因此,本研究旨在通过参考近年来青海湖的扩张速度情景,探讨湖泊迅速扩张如何影响或潜在威胁湖区周边的道路、居民点和草地. 本文将利用 Landsat 遥感数据和 Hydroweb 测高数据,对 1995—2019 年青海湖长时序水位、面积以及水储量动态变化进行研究. 考虑青海湖周边的气候变化背景,选择湖泊水量上升期的水量变化率作为其未来的扩张情景,基于湖盆 DEM 数据模拟湖泊扩张淹没范围,分析青海湖扩张对人居设施与草地的影响和潜在威胁. 该研究有助于我们更系统地掌握和理解青海湖的动态变化影响,为青海湖流域的生态环境保护 and 湖泊变化持续监测提供依据,并有望为青海湖扩张对当地居民造成的影响和潜在威胁提供重要的科学参考.

## 1 研究区概况

青海湖 ( $36^{\circ}32' \sim 37^{\circ}15' \text{N}$ ,  $99^{\circ}36' \sim 100^{\circ}47' \text{E}$ ) 位于青藏高原东北部,是我国最大的内陆湖泊 (图 1). 青海湖由北部祁连山脉的大通山、南部的日月山和青海南山断层陷落形成. 湖区东西长度约 109 km,南北宽度约为 39.8 km,平均水深 18.3 m<sup>[27]</sup>,2019 年湖泊面积为  $4519.22 \text{ km}^2$ ,同期水位为 3196.92 m. 青海湖流域位于中国东部季风区、西北干旱区和青藏高原高寒区的交汇地带的交汇地带,属于高原半干旱高寒气候,具有明显的区域性气候特征,是全球气

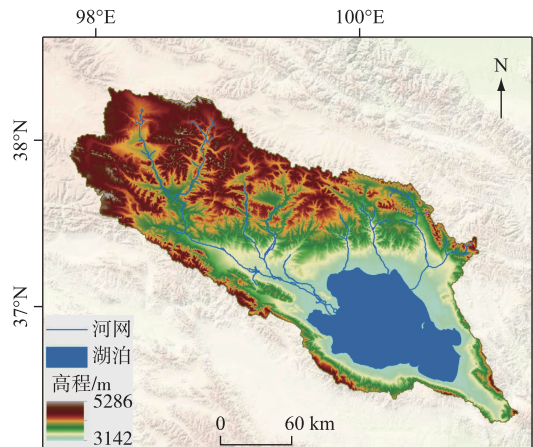


图 1 青海湖地理位置及周边概况  
Fig.1 Location and surrounding topographic features of Lake Qinghai

候变化最敏感的地区之一<sup>[29,40-41]</sup>. 该地区的温度随海拔高度变化很大,年平均气温在-4.6~4.0℃之间<sup>[42]</sup>,呈现出从东南向西北递减的趋势,最高气温在 24.4~33.7℃之间,最低气温在-35.8~-26.9℃之间<sup>[20]</sup>. 年平均降水量在 350~450 mm 之间<sup>[43]</sup>,其中夏季和秋季(6—9月)降水量占总降水量的 80%以上. 降水是青海湖流域河流、湖泊和地下水的主要来源. 流域内汇入湖泊较大的河流主要有布哈河、沙柳河以及哈尔盖河,其中布哈河全长 286 km,流域面积 14337 km<sup>2</sup>,对入湖径流的贡献率为 46.9%;第 2 大河流为沙柳河,流量为 2.46×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,占入湖总径流量的 14.5%<sup>[20,44-45]</sup>. 青海湖流域作为脆弱生态系统的典型地区,是我重要的国家级自然保护区之一,对青藏高原东北部的生态环境安全意义重大.

2 数据与方法

2.1 利用 Landsat 影像提取水域面积

本文采用美国地质调查局(USGS)(<http://glovis.usgs.gov>)发布的 Landsat 系列卫星遥感数据产品进行湖泊水域范围提取,主要是 Landsat 5 TM(30 m)、Landsat 7 ETM+(30 m)、Landsat 8 OLI(30 m)等影像数据. 本研究所有影像均经过辐射定标,大气校正和几何校正. 青海湖是以降水补给为主的封闭湖泊,一年中降水主要集中于 6—9 月之间,占年度总降水量的 80%以上<sup>[20,26-27]</sup>. 为了使湖泊范围在长时间序列的时间尺度上具有可比性,选择采集日期主要在 9—11 月之间的图像,这是在雨季结束时,湖泊水位较高并仍处于相对稳定的阶段. 另外该时间段内的影像云量较小,并且湖面还没有开始大规模结冰. 根据遥感数据的质量和云量的情况,选择该时段中云量及湖冰最少的一张影像作为水域范围提取的基础影像,且尽量保证遥感影像采集的日期相近,对于个别年份该时段的数据质量较差或者缺失时,则采用相邻月份的数据替代. 使用的影像具体时间和提取结果参考表 1.

为了获取稳定的青海湖水体范围,本文采用归一化差分水体指数(NDWI)动态阈值分割方法<sup>[46-47]</sup>,处理过程如下:(1)先选定一个较低的 NDWI 阈值(比如-0.1)对青海湖每个实相的影像进行潜在水体像元的初步筛选,将水陆边界大致分开,此时会有很多 NDWI 值偏大的非水体像元被误判为水体;(2)按照湖泊的边界进行缓冲区扩张(1 倍湖泊面积),对缓冲区做 NDWI 阈值迭代分割,利用双峰分布准则进行逐像元判断,直到提取出的水体与原始影像上的水体分布达到最佳匹配;(3)利用动态阈值算法自动化实现湖泊提取时最佳分割阈值的选取,最后对提取结果进行目视检查和人工修正,得到经过质量控制的湖泊面积统计结果. 基于该方法提取水域范围的自动化程度和检测精度较高,已经得到广泛应用<sup>[48-51]</sup>.

表 1 青海湖配对观测的水域面积与水位  
Tab.1 Temporal paired lake area and water level observations of Lake Qinghai

影像获取时间	水域面积/km <sup>2</sup>	水位观测时间	水位/m
1995-11-09	4254.52	1995-11-27	3194.19
1999-08-08	4251.12	1999-08-24	3193.97
2002-10-11	4222.79	2002-10-19	3193.86
2004-11-01	4200.68	2004-10-23	3193.68
2005-11-04	4230.36	2005-11-11	3194.09
2006-09-20	4233.56	2006-09-23	3194.14
2008-11-28	4237.22	2008-12-06	3194.12
2009-09-28	4264.97	2009-09-12	3194.23
2013-10-09	4321.90	2013-10-27	3194.96
2014-11-13	4327.04	2014-11-16	3195.31
2016-11-02	4398.39	2016-10-26	3195.67
2018-09-01	4493.52	2018-09-01	3196.50
2019-11-27	4519.22	2019-11-27	3196.92

2.2 水位数据处理和水量估算

青藏高原地理环境复杂且恶劣,大多数湖泊难以实现长时间、连续的实地观测,而测高卫星的迅速发展

较好地弥补了这个不足,为我们提供了长时序连续的历史水位信息. 本研究使用的青海湖水位数据(1995—2019 年)来源于 Hydroweb(<http://Hydroweb.theia-land.fr>). Hydroweb 数据来源于法国图卢兹的 Laboratoire d'Etudes en Oceanographie et Geode'sie Spatiale 建立的数据中心,该数据中心向用户免费提供了全球主要湖泊的水位、面积以及水储量长时间序列资料. 湖泊水位数据是多个不同服役年限测高卫星数据的融合,包括 Topex-Poseidon(1992—2005 年)、Jason1(2001—2013 年)、ICESat(2003—2009 年)、Jason-2(2008 年至今)、Jason-3(2016 年至今)、Sentinel-3A(2016 年至今)、ICESat-2(2018 年至今)等<sup>[52]</sup>. 由于测高水位的时间密度分布并不完全一致,很多年份会缺失部分月份的数据,为了使湖泊长时序水位变化具有可比性,并与影像提取水域范围的时间段保持一致,因此统一选择采集日期在 9—11 月的平均水位相对于前一年该时段的水位差作为年平均水位变化. 基于 Hydroweb 数据提供的 1995—2019 年青海湖的长时序水位数据,整理并分析得到青海湖的水位年际变化规律.

利用对应时段的测高水位和面积时间序列构建统计模型(具体信息如表 1),通过不同时段的测高水位信息或湖泊面积可以重建对应时段的面积或水位信息:

$$A = f(h) \quad (1)$$

式中, $A$  代表湖泊面积, $h$  代表对应时段的湖泊水位.

基于水位—面积经验关系,进一步估算青海湖水储量变化. 根据水量变化经验公式<sup>[53]</sup>估算得到湖泊长时间序列的水量变化:

$$\Delta V = \frac{1}{3}(H_2 - H_1) \cdot (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2}) \quad (2)$$

式中, $H_1$ 和 $H_2$ 代表两个时刻对应湖泊水位, $A_1$ 和 $A_2$ 代表相应时刻湖泊水域面积, $\Delta V$ 为两个时刻期间的湖泊水储量变化量.

### 2.3 基于 DEM 的湖泊淹没模拟

本研究使用的 SRTM-1 DEM 数据,来源于 2015 年发布的 SRTM V3 数据集(<https://dwtkns.com/srtm30m/>),分辨率为 30 m. 该数据在 2000 年 2 月由美国发射的“奋进”号航天飞机上装载的干涉成像雷达完成数据采集工作,数据覆盖 60°N~56°S,覆盖全球陆地表面的 80% 以上. SRTM 地形数据按采样精度可以分为 SRTM-1 DEM 和 SRTM-3 DEM,分别对应分辨率约为 30 和 90 m 的数据.

本文利用 DEM 数据进行湖泊淹没模拟,该模拟方法可用性较强且较为直观,可以有效地获取湖泊淹没范围. 算法的工作流程如图 2 所示. 本研究利用 Landsat 影像和 Hydroweb 数据提取了 1995—2019 年青海湖长时序的面积和水位变化,并通过经验方程估算了水储量变化. 参考 2019 年青海湖的面积和水位,由于 SRTM-1 数据为整型值,因此以 1 m 为步长通过 DEM 高程值循环迭代,模拟不同海拔青海湖的淹没范围. 然后将提取的 DEM 栅格数据转换为矢量数据,得到青海湖对应于不同高程值的最大范围,即某个高程以下的所有区域. 考虑到湖泊扩张的连通性,有必要消除未连通区域来校正湖泊范围. 等于某一高程值且与目前青海湖相连的范围为理论上的青海湖的水域范围,例如 3199 m 代表湖面高程,所有高程为 3199 m 的面积之和,即为湖面面积. 最终利用式(2)可以获取满足条件的不同海拔下的青海湖水储量增量. 由青海湖 1995—2019 年的水位变化趋势可知,2004 年之前湖泊处于萎缩阶段,2004—2019 年水位持续上升,因此选择该上升

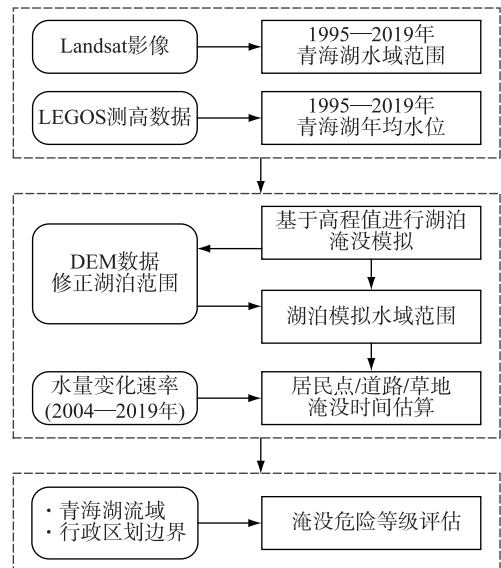


图 2 基于当前水量增长速率情景开展的湖泊淹没模拟技术流程图

Fig.2 Technology flow of lake submerged simulation based on current water storage growth rate scenario



阶段计算水量变化速率. 通过计算青海湖 2004—2019 年的水量变化率以及不同海拔下的模拟结果相对于 2019 年的湖泊水储量变化量, 得到青海湖达到不同模拟范围所需的时间, 并以此对周边居民点、道路以及草地进行风险等级评估.

## 2.4 其他数据

道路和居民点数据从国家基础地理信息中心网站获取 (<http://www.webmap.cn/>). 数据采用 1:25 万标准图幅分发提供, 图层内容含水系(点、线、面层), 公路、铁路(线层), 居民地(点、面层), 居民地地名(注记点), 自然地名(注记点)等 9 类要素层. 该数据的整体现势性为 2015 年. 本文使用的是青海湖流域的道路和居民点图层, 并结合 Google earth 影像以及电子地图数据最终整理成不同等级的道路和居民点数据.

Landsat 系列卫星具有长期连续对地观测和高时空分辨率等优势, 广泛应用于植被等地表地物信息提取, 是植被变化监测的重要数据源之一. 本文利用 Google Earth Engine 平台, 使用青海湖流域内 2000—2019 年 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像进行高时空分辨率 *NDVI* 植被指数计算, 分析青海湖流域的植被覆盖年际变化, 所有影像均经过辐射定标和大气校正. 由于生长季最大 *NDVI* 可以更好地反映地表植被覆盖状况, 因此对于 *NDVI* 数据的处理, 统一采用最大值合成法得到流域内每年最大 *NDVI*. 利用植被 *NDVI* 开展湖泊扩张对周边草地淹没分析主要包括两部分内容: 第 1 部分为水位上升阶段(2004—2019 年)的草地淹没分析, 第 2 部分是根据青海湖扩张速率(2004—2019 年)情景淹没模拟结果, 分析未来 50 a 流域内植被淹没情况. 此外, 对于 2004—2019 年的植被淹没分析, 采用 2000—2004 年青海湖流域多年平均 *NDVI* 值作为参考; 对于 2019 年之后的植被淹没模拟, 则采用 2004—2019 年青海湖流域内多年平均 *NDVI* 值作为参考. 对于 *NDVI* 数据的统计分析处理, 首先统一剔除掉青海湖水域范围内的 *NDVI* 数据, 然后参考前人的研究及结合青海湖流域植被实际情况<sup>[54-56]</sup>, 将流域内多年平均 *NDVI* 数据划分为高(>0.6)、中(0.4~0.6)、中低(0.2~0.4)和低(<0.2)植被覆盖度 4 个等级, 最后统计流域内各等级的面积、研究时段被淹面积以及被淹部分在各等级的所占比例.

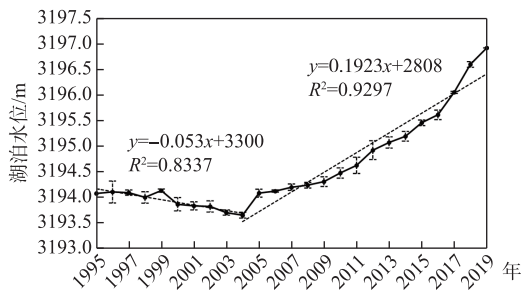


图 3 1995—2019 年青海湖水位年际变化  
Fig.3 Interannual variations of the water level of Lake Qinghai from 1995 to 2019

## 3 结果分析

### 3.1 湖泊变化特征

青海湖 1995—2019 年的水位变化特征呈现两个不同的阶段(1995—2004 年和 2004—2019 年, 图 3): 第 1 阶段水位整体呈下降趋势, 1995 年水位为 3194.07 m, 2004 年水位逐渐下降到 3193.65 m, 水位共下降 0.42 m; 第 2 阶段青海湖水位呈逐年上升趋势, 2004 年是青海湖水位变化的转折点, 2019 年水位达到 3196.92 m, 水位年均上升速度超过 0.22 m/a. 1995—2019 年青海湖水域面积总体呈先减少后增加的趋势, 面积由 1995 年 11 月的 4254.52 km<sup>2</sup> 减少至 2004 年 11 月的 4200.68 km<sup>2</sup>, 共减少 53.84 km<sup>2</sup>. 在

观测时段内, 2004 年的湖泊面积降到最低, 在此之后湖泊水域面积持续上涨, 这与图 3 显示的水位上涨趋势一致. 截至 2019 年 11 月, 湖泊面积已经增长至 4519.22 km<sup>2</sup>, 面积年均增长率为 21.24 km<sup>2</sup>/a.

青海湖水位和面积具有良好的相关性( $R^2 = 0.9821$ , 图 4a). 基于构建的水位—面积拟合关系及已有的测高水位数据, 重建对应时段青海湖的湖面面积, 进而估算湖泊水储量变化. 自 1995 年以来青海湖水量主要经历下降和回升两个阶段. 1995—2004 年青海湖水量平衡为负收支, 该时段内水量共减少 1.79 km<sup>3</sup>, 年均变化率为 -0.20 km<sup>3</sup>/a. 2004 年之后水量迅速回升, 表现出明显的增加趋势, 在 2004—2019 年间水量增加 14.25 km<sup>3</sup>, 水量年均增长率达到 0.95 km<sup>3</sup>/a(图 4b).

### 3.2 湖泊扩张淹没模拟

通过 2019 年青海湖的湖岸线提取对应 DEM 的平均高程约为 3198 m, 因此本研究以 3198 m 岸线高程为基础进行未来水位上升的模拟. 以青海湖流域的 DEM 数据为基础进行淹没模拟, 合并相同高程值并且与目前青海湖相连的范围, 计算出每个高程值对应的面积(表 2). 根据青海湖的湖泊面积和水位, 利用经验方

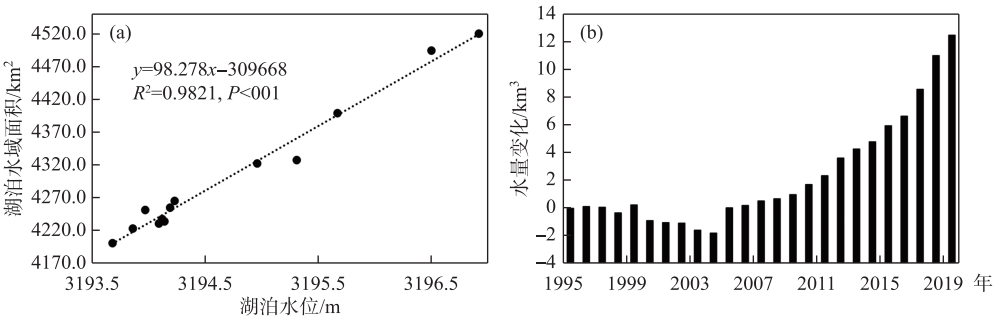


图 4 1995—2019 年青海湖水位—面积拟合关系 (a) 及水量年际变化 (b)

Fig.4 Correlation of water level and area (a) and interannual variations of the water storage (b) of Lake Qinghai from 1995 to 2019

程(式(2))估算水储量的变化. 结合青海湖 2004—2019 年水量变化速率( $0.95 \text{ km}^3/\text{a}$ )可以得到青海湖水位达到每个高程值对应的时间(表 2).

表 2 青海湖不同高程值对应的面积、水量变化及时间

Tab.2 Water area, storage changes and time corresponding to different elevations of Lake Qinghai

高程/m	湖泊面积/ $\text{km}^2$	水量变化/ $\text{km}^3$	时间/a
3198	4519.22	0	0
3199	4609.09	4.56	4.80
3200	4802.82	9.32	9.81
3201	5079.85	14.39	15.15
3202	5318.89	19.65	20.68
3203	5543.47	25.11	26.43
3204	5782.35	30.83	32.45
3205	6034.81	36.81	38.75
3206	6295.11	43.06	45.33
3207	6563.35	49.59	52.20

2004—2019 年青海湖的扩张趋势用蓝色渐变颜色表示,从水域范围变化的结果可以看出,变化较为明显的区域是西岸鸟岛地区和东岸沙岛地区,这些区域同时也是湖周边的主要旅游景区(图 5). 模拟结果显示青海湖将向四周扩张,湖泊扩张区域主要位于西北部,南部扩张趋势较缓慢. 假设青海湖所在流域湖水增加量维持目前状态,按照 2004—2019 年青海湖水量增加速率计算,则青海湖水位达到 3207 m 所需的时间约为 50 a. 当水位为 3207 m 时,模拟的青海湖面积将达  $6563.35 \text{ km}^2$ ,较 2019 年湖泊水位 (3196.92 m) 约高 10 m,面积增加  $2044.13 \text{ km}^2$ ,水储量增加近  $50 \text{ km}^3$ .

3.3 青海湖流域道路和居民点淹没分析

青海湖是我国面积最大的内陆湖泊,其湖面扩张和水位上涨严重影响了当地农牧民的生活. 基于本研究的道路和居民点数据,截至 2019 年青海湖已经淹没了周边

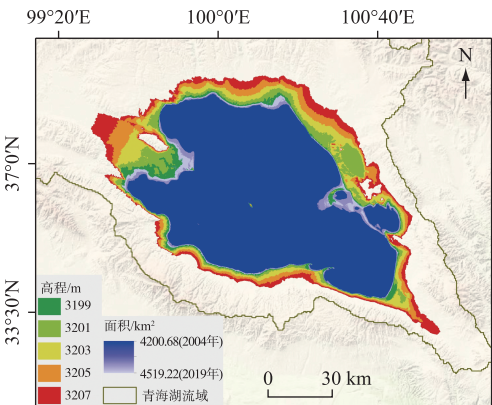


图 5 青海湖未来 50 a 水域面积变化模拟

Fig.5 Simulation of Lake Qinghai area changes in the next 50 years

部分居民点(主要位于切吉乡、金滩乡以及青海湖乡)以及长约 18.75 km 的道路. 本文以青海湖 2004—2019 年年均水量变化速率情景模拟湖泊水域淹没范围和估算未来 50 a 居民点和道路淹没情况(图 6). 风险等级较高的区域主要是青海湖的北部和西北部,特别是西岸的鸟岛地区扩张明显,该地区是流入青海湖的主要河流——布哈河的人海口,不断扩张的岸线将会对周边人类生存环境造成破坏. 根据本研究扩张速率计算,未来 10 a 会有 17 个居民点和长度约为 129.81 km 的道路被淹没;未来 50 a 则会大面积淹没周边区域,淹没居民点个数和道路长度分别为 178 个和 1286.91 km,其中湖区北侧的青藏铁路将被淹没 113.79 km.

图 6c 和 6d 为对未来 50 a 居民点和道路淹没模拟结果,以乡镇行政区划为统计单位来评估其风险等级. 青海湖横跨共和、海晏和刚察 3 个县,模拟结果显示大约有 10 个乡镇在未来 50 a 会受到不同程度的淹没威胁,这些风险等级较高的乡镇主要包括切吉乡、泉吉乡和金滩乡. 统计结果表明,未来 50 a 切吉乡会有 56 个居民点和 309.93 km 道路被淹没;泉吉乡会有 29 个居民点和 241.14 km 道路被淹没;金滩乡将会淹没 27 个居民点和 163.68 km 道路. 这 3 个乡镇的风险等级较高的主要原因是均地处青海湖扩张明显的区域,其中泉吉乡和切吉乡位于青海湖扩张明显的鸟岛和铁布卡湾附近,金滩乡则位于东岸的沙岛附近.

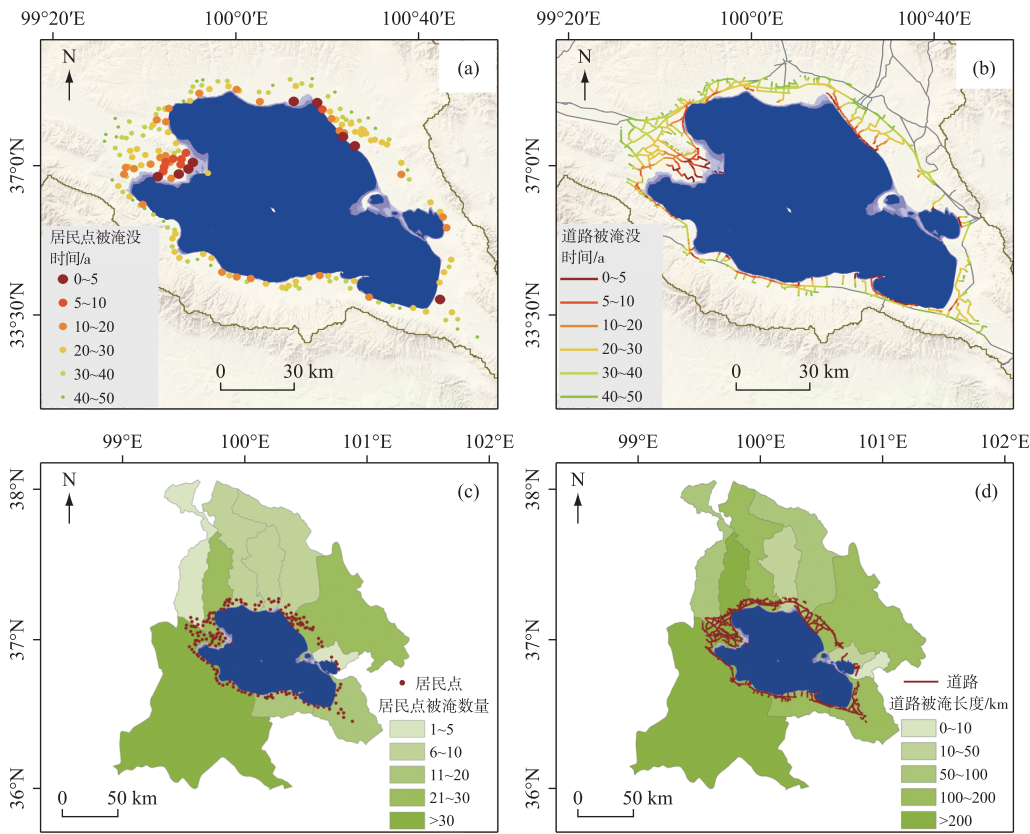


图 6 青海湖流域未来 50 a 被淹没居民点和道路的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of submerged settlements and roads in Lake Qinghai Basin in the next 50 years

3.4 青海湖流域草地淹没分析

从 2000—2004 年青海湖流域内多年平均 *NDVI* 值空间分布可以看出,流域内中等植被覆盖区所占面积最大(图 7a). 2004 年之前青海湖流域内植被总面积为 25403.86 km<sup>2</sup>,截至 2019 年共淹没 307.94 km<sup>2</sup>,约占植被总面积的 1.21%. 其中低植被覆盖区的淹没面积最大,为 179.98 km<sup>2</sup>,占低植被覆盖区总面积的 4.87% (表 3),主要原因是扩张明显的青海湖东岸区域为低植被覆盖区;而高植被覆盖区在青海湖附近分布较少,2004—2019 内淹没面积为 12.87 km<sup>2</sup>.

从 2004—2019 年青海湖流域内多年平均 *NDVI* 值空间分布可以看出,其中流域内中等植被覆盖区所占面积最大,高植被覆盖区次之(图 7b)。2070 年前后青海湖流域内植被淹没总面积预计可达 2042.22 km<sup>2</sup>,其中,中等植被覆盖区被淹面积最大,为 905.21 km<sup>2</sup>,占中等植被覆盖区总面积的 9.72%;高植被覆盖区次之,被淹面积达到 480.35 km<sup>2</sup>,占高植被覆盖区总面积的 6.01%(表 4)。

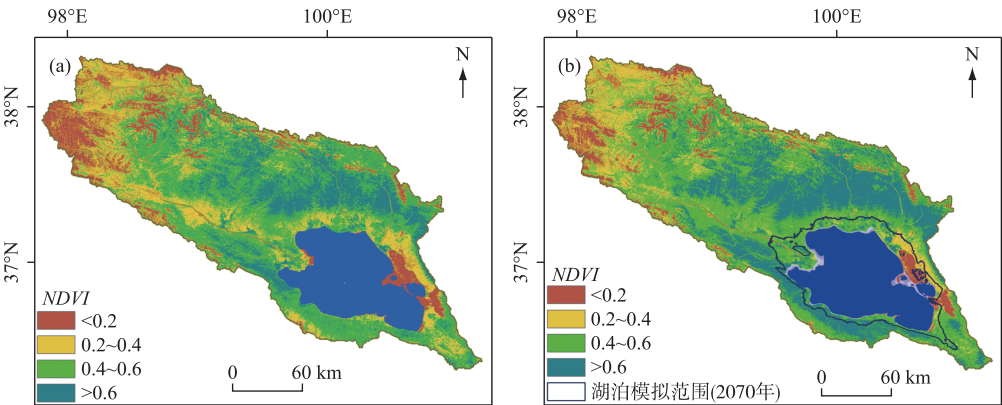


图 7 青海湖流域内 2000—2004 年(a)和 2004—2019 年(b)多年平均 *NDVI* 均值空间分布  
Fig.7 Spatial distribution of average *NDVI* in Lake Qinghai Basin from 2000 to 2004 (a)  
and from 2004 to 2019 (b)

表 3 2004—2019 年青海湖流域内植被的淹没分析结果  
Tab.3 Analysis results of submerged vegetation in Lake Qinghai Basin from 2004 to 2019

	低覆盖区	中低覆盖区	中覆盖区	高覆盖区
<i>NDVI</i> 分级	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	>0.6
流域内面积/km <sup>2</sup>	3695.18	7051.51	10476.22	4180.95
淹没面积/km <sup>2</sup>	179.98	70.85	44.24	12.87
比例/%	4.87	1.00	0.42	0.31

表 4 未来 50 a 青海湖流域内植被的淹没分析结果  
Tab.4 Analysis results of submerged vegetation in Lake Qinghai Basin in the next 50 years

	低覆盖区	中低覆盖区	中覆盖区	高覆盖区
<i>NDVI</i> 分级	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	>0.6
流域内面积/km <sup>2</sup>	2661.31	5117.72	9311.91	7992.12
淹没面积/km <sup>2</sup>	256.28	400.38	905.21	480.35
比例/%	9.63	7.82	9.72	6.01

4 讨论

青海湖地处东亚季风、印度季风和西风急流三者汇聚带,是全球气候变化的重要响应区,其动态变化与整个高原的气候和环境变化密切相关。作为封闭型内陆湖,青海湖的补给主要来源于入湖径流和降水量,冰川融水和人类活动对青海湖水量影响较小。在以前的研究中,由于缺乏实地测量和遥感数据分辨率以及获取时间的限制,青海湖长时序连续湖泊面积与水位监测相对缺乏。基于雷达和激光卫星测高快速发展,更多的研究开始综合利用光学影像数据和测高水位数据评估湖泊的动态变化。本研究充分利用中高分辨率遥感数据的连续性,利用 Landsat 系列遥感数据监测青海湖面积的动态变化,同时利用测高卫星提供的水位数据分析青海湖长时序水位的年际变化。本文对于 1995—2019 年青海湖变化特征的分析结果与前人研究基本



一致<sup>[20,24,26-28]</sup>,结果表明,1995—2019年青海湖水域面积总体呈先减少后增加的趋势,2004年是水位变化的转折点,其水位和面积为最小值,之后青海湖进入稳定扩张期。

已有研究表明,近年来青海湖流域气候变化特征主要表现为气温、降水逐渐增加及蒸散发减少<sup>[20,43]</sup>。青海湖作为封闭型内陆湖,湖泊不断扩张与这一气候背景密切相关,而冰川融水以及人类活动对青海湖水量贡献甚微<sup>[26-27]</sup>。另外许多研究利用国际耦合模式比较计划第5阶段(CMIP5)气候模式中的RCP4.5和RCP8.5情景开展了青藏高原区域未来气候和环境变化的评估和预测,预估结果表明未来青藏高原气候变化仍以变暖和变湿为主要特征<sup>[57-61]</sup>。基于气候变化模型预测的结果表明,以1961—1990年为基准期参照,内陆湖区在2015—2050年的降水量将增加10.4%~11.0%<sup>[59]</sup>。此外,在气候变化RCP4.5情景和RCP8.5情景下,到2030年冰川分别会减少9%~32%和8.7%~26.1%<sup>[62-64]</sup>。综合考虑冰川和降水变化对水量平衡的贡献,可以推测出高原内陆湖泊水量在未来几十年内有持续增加的趋势。另外丁之勇等<sup>[43]</sup>通过分析1959—2015年环青海湖地区的气候变化特征,结果表明该地区的年均气温和年降水的Hurst指数均大于0.5,说明气温和降水在未来依然会呈现一定的增加趋势。基于前人的研究,我们能够推断青海湖流域的气温和降水在未来一段时间内仍以上升趋势为主,同时水位也会持续上涨,甚至可能更加剧烈。1995—2019年间青海湖经历了由萎缩到快速扩张的转型,因此我们选择青海湖水量上升期的水量变化速率作为其未来的扩张情景来模拟湖泊的淹没范围,侧重于探讨湖泊扩张如何影响或潜在威胁湖区周边的道路、居民点及草地。当然,预测存在一定的不确定性,由于气候的波动,气温和降水可能存在年际波动,因此水位也可能会出现波动性增长的情况。

青海湖由于其独特的地理位置,其变化不仅对周围的生态环境敏感,而且可能对当地的生活环境产生明显的反馈<sup>[65]</sup>。近几十年,青藏高原上已经发生了多起湖泊外溢对周边区域造成破坏的案例,严重影响了长江源区的生态环境,湖泊扩张带来的影响不容忽视<sup>[35,38-39,41,66]</sup>。青海湖流域自2004年以来,年平均气温呈上升趋势,年降水量波动增加,导致湖泊面积不断扩大<sup>[20,67-68]</sup>。青海湖的变化与环湖区域生态环境密切相关,湖泊不断扩张,导致周围植被覆盖状况变差,对当地人居环境和鸟类栖息地造成一定程度的破坏。现有报道<sup>[27]</sup>和实地调查显示,近年来青海湖由于不断上涨的水位已经导致鸟岛地区的道路、码头和部分建筑物被湖水淹没或破坏。

一些研究使用SRTM DEM数据来估计蓄水变化,并且证明SRTM DEM数据的实际表现远远好于预期结果<sup>[69-70]</sup>,另外有研究使用DEM数据模拟可可西里盐湖的外扩范围,并预测盐湖溃决时间<sup>[39]</sup>。本文采用类似的方法,基于湖盆DEM数据进行青海湖扩张的淹没范围模拟,并在此基础上分析青海湖扩张对周边居民点、道路和植被产生的影响和潜在威胁,同时对其风险性等级进行评估。由于DEM数据分辨率、道路和居民点数据现势性和精度的限制,模拟结果可能夸大了淹没范围,但是本研究侧重于分析青海湖的动态变化及模拟其不断扩张预计造成的不利影响,旨在更系统地政府部门开展流域生态环境保护和灾害监测预警工作提供科学参考。其中,青海湖水位、面积以及未来扩张趋势的分析,有助于监测青海湖的动态变化;而湖区周边道路、居民点及草地的淹没模拟结果,则有利于及时地判断潜在受灾区域。为了能够及时采取规避风险的措施,建议政府部门加强对湖边、地势低洼地段以及可能存在湖水溢出危险点的监控,同时结合地理和水文因素,从流域的层面上对扩张明显的区域制定合理的洪水防护措施,例如通过加高湖岸及开挖引河等措施减少淹没范围及淹没损失。

## 5 结论

本文基于Landsat遥感数据和Hydroweb测高数据,综合运用GIS和RS技术,对1995—2019年青海湖长时序水位、面积以及水储量动态变化进行研究;同时基于DEM数据模拟湖泊扩张淹没范围,并分析了湖泊扩张对居民点、道路和植被的影响和潜在威胁,以期当地政府开展青海湖流域的生态环境保护和灾害监测预警工作提供科学参考。

1)青海湖长时序水位变化可以分为两个不同的阶段:1995—2004年间水位共下降0.42 m;2004—2019年间水位急剧上升3.27 m,年均上升速率超过0.22 m/a。2004—2019年青海湖水域面积累计增长318.54 km<sup>2</sup>,水量增长14.25 km<sup>3</sup>。另外,本研究以2004—2019年的年均水量变化率(0.95 km<sup>3</sup>/a)为假设情景预测扩张,结果表明,在2070年前后青海湖水位将达到3207 m,此时青海湖面积将达到6563.35 km<sup>2</sup>。



2)青海湖未来 50 a 淹没模拟结果显示,淹没居民点总个数和道路长度分别为 178 个和 1286.91 km,尤其是切吉乡、泉吉乡和金滩乡 3 个乡镇风险系数较高;流域内植被淹没总面积达到 2042.22 km<sup>2</sup>,其中高植被覆盖区和中等植被覆盖区的淹没面积分别为 480.35 和 905.21 km<sup>2</sup>。

CMIP5 气候变化情景预测显示,青藏高原气候暖湿化趋势将在未来几十年持续甚至可能加剧,高原湖泊在也将较长时段持续扩张。青海湖作为青藏高原气候变化特征的重要指示湖泊,其变化对区域水循环及周边地区人类社会产生重要影响。预估未来青海湖的变化及影响,对于认识气候与环境变化对高原区域的人类生活环境和生态系统产生的影响以及促进青藏高原自然与人文系统的可持续发展具有重要的意义。未来的研究应结合更加全面的遥感观测资料和实地调查数据,例如利用高分影像解译湖区周边地物以及无人机航测数字地形产品获取高精度的评估数据,继续监测和详细分析被认为极有可能发生洪灾的湖泊。

## 6 参考文献

- [1] Sobek S, Algesten G, Bergström AK *et al.* The catchment and climate regulation of pCO<sub>2</sub> in boreal lakes. *Global Change Biology*, 2003, **9**(4): 630-641. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00619.x.
- [2] Wang JD, Song CQ, Reager JT *et al.* Recent global decline in endorheic basin water storages. *Nature Geoscience*, 2018, **11**(12): 926-932. DOI: 10.1038/s41561-018-0265-7.
- [3] Verpoorter C, Kutser T, Seekell DA *et al.* A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(18): 6396-6402. DOI: 10.1002/2014GL060641.
- [4] Alsdorf DE, Rodríguez E, Lettenmaier DP. Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, 2007, **45**(2): RG2002. DOI: 10.1029/2006RG000197.
- [5] Lehner B, Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 2004, **296**(1/2/3/4): 1-22. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028.
- [6] Song CQ, Huang B, Ke LH *et al.* Remote sensing of alpine lake water environment changes on the Tibetan Plateau and surroundings: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, **92**: 26-37. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.03.001.
- [7] Song CQ, Ke LH, Huang B *et al.* Can mountain glacier melting explains the GRACE-observed mass loss in the southeast Tibetan Plateau: From a climate perspective? *Global and Planetary Change*, 2015, **124**: 1-9. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.11.001.
- [8] Yang K, Wu H, Qin J *et al.* Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. *Global and Planetary Change*, 2014, **112**: 79-91. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.12.001.
- [9] Yao TD, Thompson L, Yang W *et al.* Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, **2**(9): 663-667. DOI: 10.1038/nclimate1580.
- [10] Zhao ZL, Zhang YL, Liu LS *et al.* Advances in research on wetlands of the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 2014, **33**(9): 1218-1230. DOI: 10.11820/dlkxjz.2014.09.009. [赵志龙, 张懿锂, 刘林山等. 青藏高原湿地研究进展. 地理科学进展, 2014, **33**(9): 1218-1230.]
- [11] Lei YB, Yang K, Wang B *et al.* Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change. *Climatic Change*, 2014, **125**(2): 281-290. DOI: 10.1007/s10584-014-1175-3.
- [12] Zhu JY, Song CQ, Wang JD *et al.* China's inland water dynamics: The significance of water body types. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(25): 13876-13878. DOI: 10.1073/pnas.2005584117.
- [13] Li JL, Sheng YW, Luo JC *et al.* Remotely sensed mapping of inland lake area changes in the Tibetan Plateau. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 311-320. DOI: 10.18307/2011.0301. [李均力, 盛永伟, 骆剑承等. 青藏高原内陆湖泊变化的遥感制图. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 311-320.]
- [14] Song CQ, Huang B, Ke LH. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **135**: 25-35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.013.
- [15] Song CQ, Huang B, Ke LH. Inter-annual changes of alpine inland lake water storage on the Tibetan Plateau: Detection and analysis by integrating satellite altimetry and optical imagery. *Hydrological Processes*, 2014, **28**(4): 2411-2418. DOI: 10.1002/hyp.9798.
- [16] Zhang GQ, Xie HJ, Kang SC *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. DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.005.
- [17] Zhang GQ, Yao TD, Shum CK *et al.* Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(11): 5550-5560. DOI: 10.1002/2017GL073773.
- [18] Zhu L, Xie M, Wu Y *et al.* 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**(13): 1294-1303.
- [19] Cui BL, Li XY. Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2015, **527/528**: 26-37. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.105.
- [20] Dong HM, Song YG, Zhang MS. Hydrological trend of Qinghai Lake over the last 60 years: Driven by climate variations or human activities? *Journal of Water and Climate Change*, 2019, **10**(3): 524-534. DOI: 10.2166/wcc.2018.033.
- [21] Zhang GQ, Xie HJ, Duan SQ *et al.* Water level variation of Lake Qinghai from satellite and *in situ* measurements under climate change. 2011: 053532. DOI: 10.1117/1.3601363.
- [22] Feng S, Tang MC, Zhou LS. 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.]
- [23] 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.]
- [24] Li Y, Duan S, Jin Y. Analysis of features and causes of Qinghai lake during the period of 1956-2011. *Yellow River*, 2014, (6): 87-89, 112. [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, 112.]
- [25] Liu RX, Liu YJ. 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.]
- [26] 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.]
- [27] Qi MM, Yao XJ, Liu SY *et al.* Dynamic change of Lake Qinghai shoreline from 1973 to 2018. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 573-586. DOI: 10.18307/2020.0225. [祁苗苗, 姚晓军, 刘时银等. 1973—2018 年青海湖岸线动态变化. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 573-586.]
- [28] Zhao Y, Liao JJ, Shen GZ *et al.* Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data. *Journal of Remote Sensing*, 2017, **21**(4): 633-644. DOI: 10.11834/jrs.20176217. [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.]
- [29] Chen L, Chen KL, Liu BK *et al.* Characteristics of climate variation in Qinghai Lake basin during the recent 50 years. *Journal of Arid Meteorology*, 2011, **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.]
- [30] Dong HM, Song YG. Shrinkage history of Lake Qinghai and causes during the last 52 years. 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. Xi'an, 2011: 446-449. DOI: 10.1109/ISWREP.2011.5893040.
- [31] Wan W, Xiao PF, Feng XZ *et al.* Monitoring lake changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the past 30 years using satellite remote sensing data. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(10): 1021-1035. DOI: 10.1007/s11434-014-0128-6.
- [32] Yuan Y, Li DL, An D. Respons of water level in Qinghai Lake to climate change in the Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2012, **31**(1): 57-64. [袁云, 李栋梁, 安迪. 青海湖水位变化对青藏高原气候变化的响应. 高原气象, 2012, **31**(1): 57-64.]
- [33] Dai YF, Wang L, Yao TD *et al.* Observed and simulated lake effect precipitation over the Tibetan Plateau: An initial study at nam Co lake. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(13): 6746-6759. DOI: 10.1029/2018JD028330.
- [34] Song CQ, Sheng YW, Zhan SG *et al.* Impact of amplified evaporation due to lake expansion on the water budget across the inner Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 2020, **40**(4): 2091-2105. DOI: 10.1002/joc.6320.
- [35] Chen AJ, Wang Z, Zhou W. Livelihood impact and community response to lake level rise in the context of climate change—Based on a village investigation around Selin Co. *Social Sciences in Yunan*, 2019, (2): 105-112. [陈阿江, 王昭, 周伟.

- 气候变化背景下湖平面上升的生计影响与社区响应—以色列林错周边村庄为例. 云南社会科学, 2019, (2): 105-112.]
- [36] Du YE, Liu BK, He WG *et al.* Dynamic change and cause analysis of Salt Lake area in Hoh Xil on Qinghai-Tibet Plateau during 1976-2017. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, **40**(1): 47-54. [杜玉娥, 刘宝康, 贺卫国等. 1976—2017 年青藏高原可可西里盐湖面积动态变化及成因分析. 冰川冻土, 2018, **40**(1): 47-54.]
- [37] Liu BK, Li L, Du Y *et al.* Causes of the outburst of Zonag Lake in Hoh Xil, Tibetan Plateau, and its impact on surrounding environment. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, **38**(2): 305-311. [刘宝康, 李林, 杜玉娥等. 青藏高原可可西里卓乃湖溃堤成因及其影响分析. 冰川冻土, 2016, **38**(2): 305-311.]
- [38] Liu WH, Xie CW, Wang W *et al.* Analysis on expansion trend and outburst risk of the Yanhu Lake in Hoh Xil region, Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, **41**(6): 1467-1474. [刘文惠, 谢昌卫, 王武等. 青藏高原可可西里盐湖水位上涨趋势及溃决风险分析. 冰川冻土, 2019, **41**(6): 1467-1474.]
- [39] Yao XJ, Sun MP, Gong P *et al.* Overflow probability of the Salt Lake in Hoh Xil region. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(9): 1520-1527. DOI: 10.11821/dlxb201609005. [姚晓军, 孙美平, 宫鹏等. 可可西里盐湖湖水外溢可能性初探. 地理学报, 2016, **71**(9): 1520-1527.]
- [40] Ji Q, Yang JP, Chen HJ. Comprehensive analysis of the precipitation changes over the Tibetan Plateau during 1961-2015. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, **40**(6): 1090-1099. [冀钦, 杨建平, 陈虹举. 1961—2015 年青藏高原降水量变化综合分析. 冰川冻土, 2018, **40**(6): 1090-1099.]
- [41] Li L, Zhang FP, Feng Q *et al.* Responses of grassland to climate change and human activities in the area around Qinghai Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(4): 1157-1165. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201904.032. [李玲, 张福平, 冯起等. 环青海湖地区草地对气候变化和人类活动的响应. 生态学杂志, 2019, **38**(4): 1157-1165.]
- [42] Cai R, Liu FG, Huang YM *et al.* The natural environment influence on tourism safety in Qinghai Lake basin. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, **28**(5): 203-208. [才让, 刘峰贵, 黄芸玛等. 青海湖流域自然环境对旅游安全的影响. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(5): 203-208.]
- [43] Ding ZY, Lu RJ, Liu C *et al.* Temporal change characteristics of climatic and its relationships with atmospheric circulation patterns in Qinghai lake basin. *Advances in Earth Science*, 2018, **33**(3): 281-292. [丁之勇, 鲁瑞洁, 刘畅等. 环青海湖地区气候变化特征及其季风环流因素. 地球科学进展, 2018, **33**(3): 281-292.]
- [44] Chang B, He KN, Li RJ *et al.* Linkage of climatic factors and human activities with water level fluctuations in Qinghai Lake in the northeastern Tibetan Plateau, China. *Water*, 2017, **9**(7): 552. DOI: 10.3390/w9070552.
- [45] Li XY, Ma YJ, Xu HY *et al.* Impact of land use and land cover change on environmental degradation in lake Qinghai watershed, northeast Qinghai-Tibet Plateau. *Land Degradation & Development*, 2009, **20**(1): 69-83. DOI: 10.1002/ldr.885.
- [46] Luo JC, Sheng YW, Shen ZF *et al.* Automatic and high-precise extraction for water information from multispectral images with the step-by-step iterative transformation mechanism. *Journal of Remote Sensing*, 2009, **13**(4): 604-615. [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): 604-615.]
- [47] Li JL, Sheng YW, Luo JC. Automatic extraction of Himalayan glacial lakes with remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2011, **15**(1): 29-43. [李均力, 盛永伟, 骆剑承. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取. 遥感学报, 2011, **15**(1): 29-43.]
- [48] Song CQ, Sheng YW. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis. *Climatic Change*, 2016, **135**(3/4): 493-507. DOI: 10.1007/s10584-015-1578-9.
- [49] Li JL, Sheng YW. An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: A case study in the Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, **33**(16): 5194-5213. DOI: 10.1080/01431161.2012.657370.
- [50] Sheng YW, Song CQ, Wang JD *et al.* Representative lake water extent mapping at continental scales using multi-temporal Landsat-8 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **185**: 129-141. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.041.
- [51] Wang JD, Sheng YW, Tong TSD. Monitoring decadal lake dynamics across the Yangtze Basin downstream of Three Gorges Dam. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **152**: 251-269. DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.004.
- [52] Crétau JF, Arsen A, 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. DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.004.

- [53] Zhang GQ, Xie HJ, Yao TD *et al.* Water balance estimates of ten greatest lakes in China using ICESat and Landsat data. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(31): 3815-3829. DOI: 10.1007/s11434-013-5818-y.
- [54] Peng WF, Zhang DM, Luo YM *et al.* Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(9): 1758-1776. DOI: 10.11821/dlxb201909005. [彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫等. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测. 地理学报, 2019, **74**(9): 1758-1776.]
- [55] Fang JM, Ma GQ, Yu XX *et al.* Spatiotemporal variation of NDVI in Qinghai lake basin and its relationship with climatic factors. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(3): 105-112. [方健梅, 马国青, 余新晓等. 青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系. 水土保持学报, 2020, **34**(3): 105-112.]
- [56] Gao LM, Zhang LL. Spatiotemporal dynamics of the vegetation coverage in Qinghai lake basin. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, **21**(9): 1318-1329. [高黎明, 张乐乐. 青海湖流域植被盖度时空变化研究. 地球信息科学学报, 2019, **21**(9): 1318-1329.]
- [57] Zhang RH, Su FG, Jiang ZH *et al.* An overview of projected climate and environmental changes across the Tibetan Plateau in the 21st century. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(32): 3036-3047. DOI: 10.1360/N972014-01296. [张人禾, 苏凤阁, 江志红等. 青藏高原 21 世纪气候和环境变化预估研究进展. 科学通报, 2015, **60**(32): 3036-3047.]
- [58] Wu FY, You QL, Xie WX *et al.* Temperature change on the Tibetan Plateau under the global warming of 1.5°C and 2°C. *Climate Change Research*, 2019, **15**(2): 130-139. [吴芳营, 游庆龙, 谢文欣等. 全球变暖 1.5°C 和 2°C 阈值时 青藏高原气温的变化特征. 气候变化研究进展, 2019, **15**(2): 130-139.]
- [59] Chen DL, Xu BQ, Yao TD *et al.* Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(32): 3023-3035. DOI: 10.1360/N972014-01370. [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. 科学通报, 2015, **60**(32): 3023-3035.]
- [60] Zhu LP, Peng P, Zhang GQ *et al.* The role of Tibetan Plateau lakes in surface water cycle under global changes. *J Lake Sci*, 2020, **32**(3): 597-608. DOI: 10.18307/2020.0301. [朱立平, 彭萍, 张国庆等. 全球变化下青藏高原湖泊在地表水循环中的作用. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 597-608.]
- [61] Yang K, Lu H, Yue SY *et al.* Quantifying recent precipitation change and predicting lake expansion in the Inner Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 2018, **147**(1/2): 149-163. DOI: 10.1007/s10584-017-2127-5.
- [62] Giesen RH, Oerlemans J. Climate-model induced differences in the 21st century global and regional glacier contributions to sea-level rise. *Climate Dynamics*, 2013, **41**(11/12): 3283-3300. DOI: 10.1007/s00382-013-1743-7.
- [63] Marzeion B, Jarosch AH, Hofer M. Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere*, 2012, **6**(6): 1295-1322. DOI: 10.5194/tc-6-1295-2012.
- [64] Bolch T, Shea JM, Liu SY *et al.* eds. Status and change of the cryosphere in the extended Hindu Kush Himalaya region. The Hindu Kush Himalaya Assessment. Cham: Springer International Publishing, 2019: 209-255. DOI: 10.1007/978-3-319-92288-1\_7.
- [65] Liu FG, Zhang HF, Chen Q *et al.* The characteristics of natural hazard regional combination law along the Qinghai-Tibet railway. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, **30**(3): 384-390. [刘峰贵, 张海峰, 陈琼等. 青藏铁路沿线自然灾害地理组合特征分析. 地理科学, 2010, **30**(3): 384-390.]
- [66] Wang LH, Zhao J, Lu AX *et al.* The study of lake variation using remote sensing near S301 highway in Tibetan Plateau from 1970 to 2000. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, **23**(6): 658-661. [王丽红, 赵杰, 鲁安新等. 基于遥感的西藏 S301 公路沿线湖泊变化研究. 遥感技术与应用, 2008, **23**(6): 658-661.]
- [67] Zhang HY, Wu YH, Liu YJ *et al.* Water storage variation of the Qinghai Lake in recent decades based on satellite observation. *Progress in Geography*, 2018, **37**(6): 823-832. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.06.009. [张洪源, 吴艳红, 刘衍君等. 近 20 年青海湖水量变化遥感分析. 地理科学进展, 2018, **37**(6): 823-832.]
- [68] Li XD, Li L, Wang GX *et al.* Water level and agriculture and husbandry characteristics in Qinghai Lake Basin: The response to climate warming and wetting. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, **34**(26): 119-127. [李晓东, 李林, 汪关信等. 青海湖流域水位和农牧业特征对气候暖湿化特征的响应研究. 中国农学通报, 2018, **34**(26): 119-127.]
- [69] Qiao BJ, Zhu LP, Yang RM. Temporal-spatial differences in lake water storage changes and their links to climate change throughout the Tibetan Plateau. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **222**: 232-243. DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.037.
- [70] Yang RM, Zhu LP, Wang JB *et al.* Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013. *Climatic Change*, 2017, **140**(3): 621-633. DOI: 10.1007/s10584-016-1877-9.