

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.05.007

青海湖 2003—2023 年水文情势变化及其对气候变化的响应

农爱乐¹, 相龙伟^{1,2}, 汪汉胜³, 陈祖刚², 李国庆², 邓帆¹

(1. 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
3. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430077)

摘要: 青海湖是青藏高原最大的内流湖, 青海湖水文情势变化研究对于区域水资源管理和生态环境保护具有重要意义。本文综合利用多源遥感影像、卫星测高和水文气象数据, 探究 2003—2023 年青海湖的面积、水位及水量变化趋势, 定量分析相关气象、水文因素对青海湖水量平衡的影响。研究表明: 2003—2023 年青海湖的面积、水位和水量增加趋势分别为 18.65 km²/a、0.20 m/a 和 0.91 km³/a, 大致可分为稳定扩张、快速扩张和缓慢扩张 3 个阶段; 在水平衡分量中, 陆面降水径流、湖面降水、冻土融水和冰川融水对总入湖水量的贡献率分别为 57.2%、41.6%、0.8% 和 0.4%, 其中陆面降水径流和湖面降水增加是青海湖水文情势发生变化的主导因素。

关键词: 水文情势变化; 气候变化; 水量平衡; 多源数据; 青海湖

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2025)05-0796-11

湖泊是重要的水资源库, 是陆地水圈的重要组成部分, 也是气候变化敏感的指示器^[1]。青藏高原是世界上最大的高原湖区, 青海湖是其上最大的内流湖, 探究青海湖的水文情势变化对于区域水资源评估、气候模拟、环境及生物多样性研究具有重要意义^[2-3]。

青藏高原地理环境恶劣, 长时序连续原位观测资料缺乏, 对认识高原湖泊水文情势变化构成挑战^[4]。但随着遥感技术的发展, 多源卫星数据的融合为湖泊长时序水文情势变化的研究提供了可靠的数据基础, 使相关研究得以突破原有的数据限制^[5-6]。OPEX/Poseidon(T/P)、Jason-1、Jason-2、Jason-3、Envisat、ICESat、Cryosat-2、SARAL、Sentinel-3 等测高卫星任务的成功运行, 为内陆湖泊长时序水位连续监测提供了良好的数据基础。李振南等^[7]基于 ERS-1/2、Envisat、Cryosat-2 测高数据, 完成了青海湖 1995—2021 年水位时间序列的构建; Wang 等^[8]利用 Envisat RA-2、SARAL、Jason-1/2 以及 Sentinel-3A/B SRAL 等多源测高卫星 SGDR 数据创建了 2002—2022 年高精度的青海湖水位变化数据集。多源遥感影像数据的发布实现了长时序湖泊面积变化监测: Yang 等^[9]利用 MODIS 影像完成了对 2000—2019 年的洞庭湖面积动态变化的监测; 叶许春等^[10]利用 Landsat 以及 MODIS 影像数据构建了鄱阳湖区 2000—2023 年连续的淹水面积数据, 揭示了鄱阳湖淹水动态的时空异质特征。对于缺乏实地观测资料的青藏高原, 遥感方法对监测该区湖泊水文情势变化提供了数据基础。

随着全球气候变暖加剧, 青藏高原湖泊在应对气候变化过程中扩张趋势明显^[11]。青海湖作为青藏高原最大的内流湖, 其水文情势变化备受关注。目前, 针对青海湖的研究主要集中在湖泊水文情势的年变化, 时

收稿日期: 2025-06-09; 网络出版日期: 2025-10-20

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20251020.1502.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42004007); 国家对地观测科学数据中心开放课题项目(NODAOP2024001)

作者简介: 农爱乐(2001—), 女, 广西田阳人, 硕士研究生, 主要从事水文遥感方面研究。

E-mail: nongaile.stu@yangtzeu.edu.cn

通信作者: 相龙伟, E-mail: lxxiang@yangtzeu.edu.cn

间分辨率降到月变化的研究较少, 且对于湖泊水文情势变化的影响机制多集中于气候因素。郭丰杰等^[12]分析了青海湖面积年均变化情况及其与入湖径流量和气候因子之间的响应关系; Zhang 等^[13]归纳了青海湖面积、水位和水量的年度变化, 探究了径流、降水和蒸发等因素对水位变化的影响。相关研究的时间分辨率未精细至月度, 也未考虑冰川变化以及冻土消融对湖泊水文情势变化的影响。然而, 较为全面地考虑湖泊水量平衡各影响因素, 从更精细的时间尺度进行分析, 是全面、准确地对青海湖水文情势变化进行评估的前提。

本文结合多源遥感影像及卫星测高数据, 综合探究 2003—2023 年青海湖年度和月度水量变化, 并利用水量平衡方程定量评估降水、蒸发、冻土及冰川融水各平衡分量变化对青海湖水量平衡的影响。研究成果可为区域水资源管理和水文预报、气候变化评估及区域生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

青海湖流域位于青藏高原东北部, 流域地势西北高东南低, 形成内陆型盆地, 流域降水向盆地内青海湖汇集(图 1)。其所在经纬度范围为 $36^{\circ}15'N-38^{\circ}20'N$ 、 $97^{\circ}50'E-101^{\circ}20'E$, 流域总面积为 $29\,700\text{ km}^2$, 流域东部以日月山为界, 西部以柴达木盆地为界, 北部以大通山为界, 南部以青海南山为界^[14]。青海湖位于青海湖流域东南部, 布哈河和沙柳河是青海湖的主要补给河流^[15]。

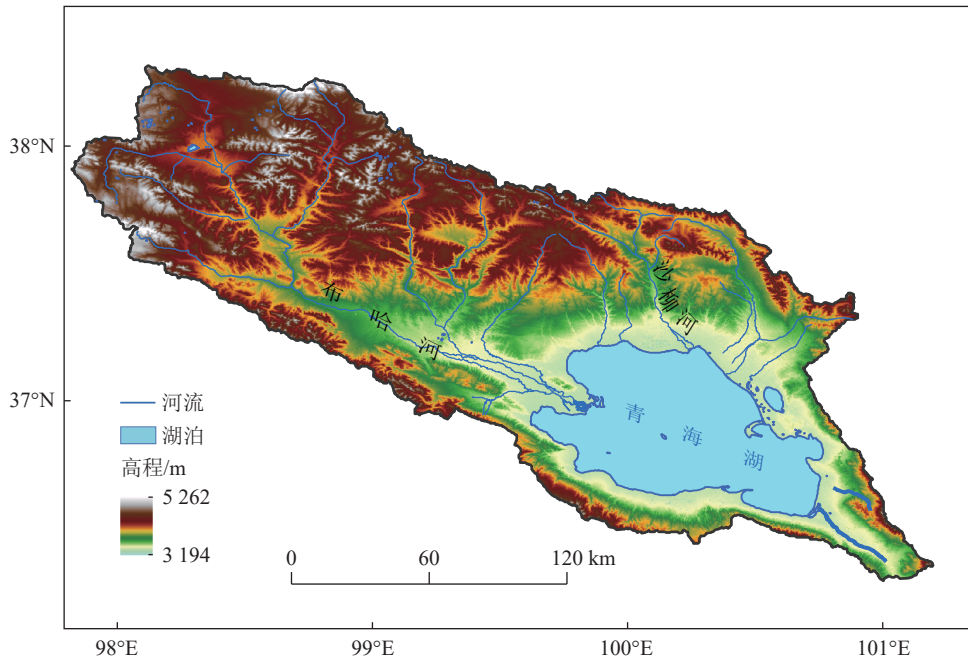


图1 研究区概况

Fig. 1 An overview map of the study area

1.2 数据来源

(1) 遥感影像数据。本文选取研究时段内云量较少或无云的 Landsat 系列卫星影像和 Sentinel-2 卫星影像提取湖泊面积, 针对因条件限制而缺失的月份, 依据该时段内湖泊面积与水位间的统计函数关系, 用二次

多项式进行拟合, 补全缺失的湖泊面积数据。针对冰川面积的提取, 本文主要选取 7—9 月的 Landsat、Sentinel-2 以及 SPOT-4 卫星影像。

(2) 卫星测高数据。本文选用多源卫星测高数据构建青海湖水位时间序列, 包括 ICESat、ICESat-2、CryoSat-2、Envisat、Jason-1、Jason-2、SARAL 和 Sentinel-3, 青海湖的可用数据从 2003 年开始, 故本文研究时段设定为 2003—2023 年。因卫星服役时间、卫星重访周期及湖泊周围复杂地形等限制, 各卫星测高数据均有缺失^[4], 即使综合上述卫星测高数据, 除去系统偏差后仍有个别月份测高数据缺失, 对于缺失数据, 本文利用二次多项式拟合方法补齐。

(3) 气象数据。湖面降水采用离青海湖最近的刚察站监测结果(<https://www.ncei.noaa.gov/>)。考虑到流域面积较大, 单一气象站观测降水数据具有一定的空间局限性, 难以准确反映整个流域降水过程, 本研究的陆地降水采用空间覆盖更广的 MSWEP 降水数据(<https://www.gloh2o.org/mswep/>), 气温采用中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集(1901—2023 年)^[16]。考虑到湖泊蒸发与陆地蒸散发在机制及量值上存在显著差异, 本文根据杨针娘等^[17]提出的分类型蒸发计算方法, 基于气温和水面高程等参数对湖面、陆地蒸散发进行估算, 以提高水量平衡分析的准确性。

(4) 其他数据。用于结果验证的湖泊面积和水位变化数据来源于文献[18]的研究结果。土壤湿度数据来源于 GLDAS(<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)。为了评估冻土融水, 本文基于国家青藏高原数据中心提供的青藏高原冻土变化数据集(1961—2020 年)(<https://data.tpdac.ac.cn/>), 每 5 a 获取研究区 1 期的季节冻土及永冻土分布数据。针对 2021—2023 年时段, 本文采用 2 次多项式拟合冻土分布结果。

2 研究方法

2.1 遥感影像投影与重采样

本文以 Landsat 数据为主, Sentinel-2 数据作为补充, 为保证影像在投影及空间分辨率上的一致性, 将 Sentinel-2 投影到与 Landsat 数据相同的坐标系, 空间分辨率重采样至 30 m。

2.2 湖泊面积提取

本文利用归一化差异水体指数(I_{NDWI})提取湖泊面积^[19]。具体公式如下:

$$I_{NDWI} = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}} \quad (1)$$

式中: ρ_{GREEN} 、 ρ_{NIR} 分别为绿光波段和近红外波段处的光谱反射率, %。

2.3 湖泊水位数据

在构建长时序水位序列时, 需有效校正多源卫星测高数据之间的系统偏差, 从而获得高时空分辨率水位时间序列^[20]。因此, 本文选取 ICESat-2 卫星测量结果为参考基准, 按照式(2)^[21]依次对测高数据进行偏差校正, 并取校正后的平均值作为最终的水位。

$$H_{cor,Am} = H_{Am} + \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k (H_{Bn} - H_{An}) \quad (2)$$

式中: $H_{cor,Am}$ 、 H_{Am} 分别为校正后、校正前 A 卫星第 m 个月的测高水位, m ; H_{Bn} 、 H_{An} 分别为重叠时段 B 卫星和 A 卫星第 n 个月的测高水位, m ; k 为重叠时段样本量。

2.4 湖泊水量变化量估算

结合遥感影像提取的湖泊面积及卫星测高提取的水位, 计算湖泊水量变化的公式如下^[22]:

$$\Delta V_{i+1} = \frac{(H_{i+1} - H_i) \times (A_i + A_{i+1} + \sqrt{A_i \times A_{i+1}})}{3} \quad (3)$$

式中: ΔV_{i+1} 为第 $i+1$ 个变化时段湖泊水量变化, km^3 ; H_i 和 H_{i+1} 分别为起始和结束时刻的湖泊水位, km ; A_i 和 A_{i+1} 分别为起始和结束时刻的湖泊面积, km^2 。

2.5 蒸散发量估算

根据杨针娘等^[17]的研究成果, 估算湖面蒸发公式如下:

$$E_{\text{lake}} = a(43.61 + 0.018H + 5.1T) \quad (4)$$

式中: E_{lake} 为湖面蒸发量, mm ; H 为月均水位, m ; T 为月均气温, $^{\circ}\text{C}$; a 为湖面蒸发量校正系数, 取 0.80。

估算陆地蒸散发公式为

$$E_{\text{land}} = b[41.73 \exp(0.148T)] \quad (5)$$

式中: E_{land} 为陆地蒸散发量, mm ; b 为陆地蒸散发量校正系数, 取 0.625。

2.6 冰川边界提取及冰川融水估算

(1) 冰川边界提取。归一化差异雪指数 (I_{NDSI})^[23] 常用于冰川边界的提取, 具体公式如下:

$$I_{\text{NDSI}} = \frac{\rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{GREEN}} + \rho_{\text{SWIR}}} \quad (6)$$

式中: ρ_{SWIR} 为短波红外波段处的光谱反射率, %。

(2) 冰川融水估算。采用冰川经验容积公式^[24] 计算冰川体积, 具体公式如下:

$$V_g = 0.033 6S^{1.43} \quad (7)$$

$$G_m = 0.91V_g \quad (8)$$

式中: V_g 为冰川体积, km^3 ; S 为冰川面积, km^2 ; G_m 为冰川融水量, km^3 。冰和水之间的转换系数为 0.91。

2.7 冻土融水估算

本文结合 Xue 等^[25] 提供的青海湖流域冻土区地表沉降速率 (季节冻土区为 2.22 mm/a , 永久冻土区为 4.58 mm/a), 对青海湖流域冻土融水进行估算。根据 Wang 等^[26], 估算公式如下:

$$V_{\text{melt}} = 0.91 \sum dC_{\text{grid}} \quad (9)$$

式中: V_{melt} 为冻土融水量, km^3 ; d 为地表沉降速率, mm/a ; C_{grid} 为网格单元的面积, km^2 ; \sum 表示对所有冻土网格单元求和。

2.8 水量平衡模拟

青海湖水量变化主要由冰川、冻土融水、湖面净降水 (湖面降水 - 湖面蒸发) 和降水引起的径流 (陆面降水 - 陆面蒸散发 - 土壤湿度) 造成。根据 Zhang 等^[6] 青海湖的水量变化 (ΔV) 可表示为:

$$\Delta V = \Delta P + \Delta R_p + \Delta G_m + \Delta V_{\text{melt}} \quad (10)$$

$$\Delta P = P_L - E_L \quad (11)$$

式中: ΔP 为湖面净降水; P_L 为湖面降水; E_L 为湖面蒸发; ΔR_p 为陆面降水引起的径流变化量; ΔG_m 为冰川融水变化量; ΔV_{melt} 为冻土融水变化量; 上述变量单位均转换为 km^3 。

3 结果与分析

3.1 青海湖面积变化

本文获取了 2003—2023 年青海湖月度面积变化时间序列 (图 2(a)), $f(x)$ 为拟合线, R^2 与 E_{RMS} 分别为决

定系数和均方根误差),其中,缺失的月度数据采用湖泊面积—水位关系(图2(b))拟合的二次多项式补全,将补齐后的湖泊面积与文献[18](2003—2020年)的湖泊面积对比(图2(c)),进一步验证了本研究湖泊面积提取结果的可靠性。

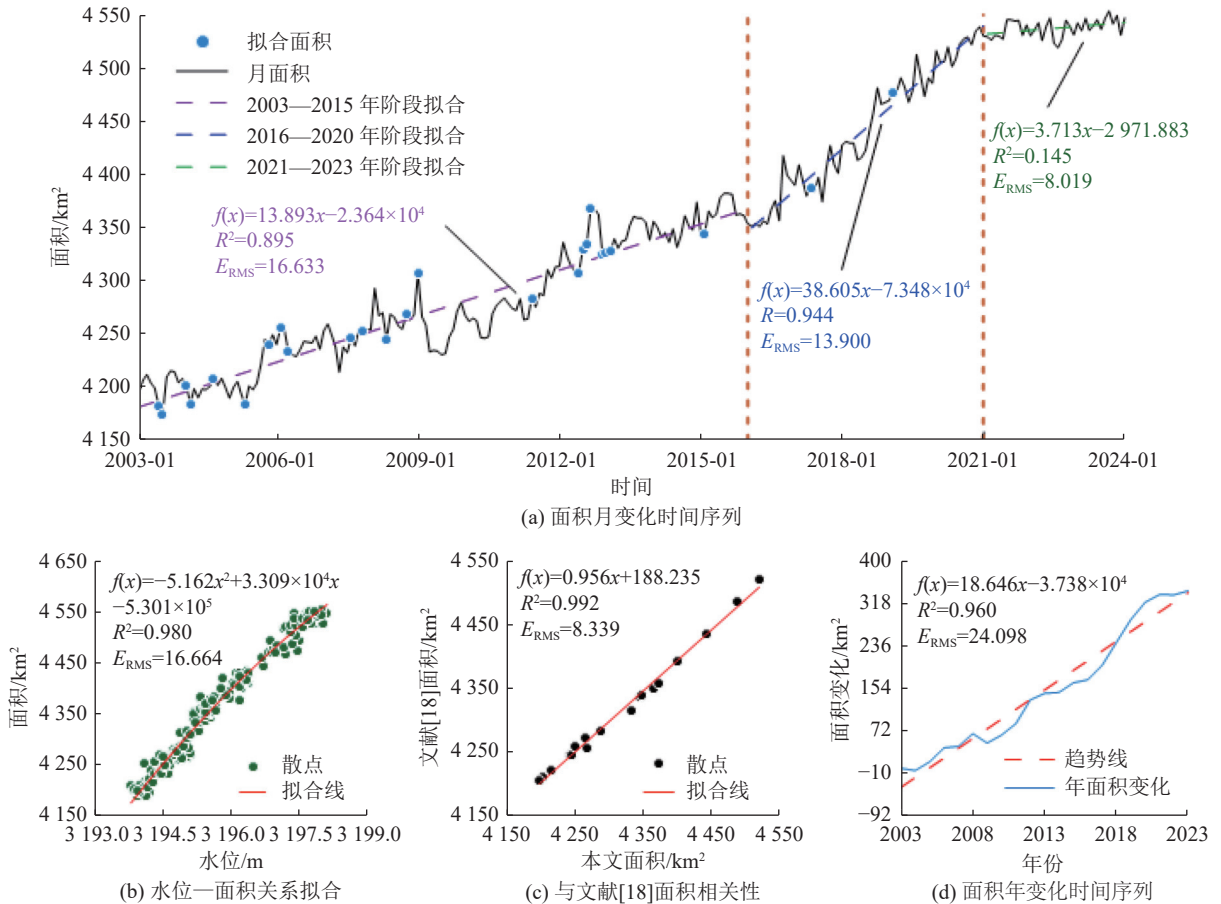


图2 2003—2023年青海湖面积变化

Fig. 2 Changes in the area of Qinghai Lake from 2003 to 2023

从月度面积变化时间序列(图2(a))来看,青海湖扩张在整个研究时段表现并不一致,可分为稳定扩张期(2003—2015年)、快速扩张期(2016—2020年)和缓慢扩张期(2021—2023年)3个阶段,扩张速率分别为13.89、38.61和3.71 km²/a。从年际变化来看(图2(d)),2003—2023年间青海湖面积虽存在年际波动,但总体呈上升趋势,湖泊面积从2003年4 202.39 km²增长到2023年4 542.40 km²(图2(a)),增长了340.00 km²,扩张速率为18.65 km²/a。

将2003年、2016年、2020年、2023年作为分割时间点观察青海湖的水陆边界变化情况,由图3可知,青海湖面积扩张最明显的区域主要为湖泊的西部、东部(沙岛湖和海晏湾)和北部。尤其是湖泊西部和东部2003年以来不断向外扩张,2016年青海湖的子湖沙岛湖及海晏湾已经与主湖相连,2020年连接范围继续扩大,2023年两子湖与主湖的边界几乎已经完全被湖水淹没。

3.2 水位变化

青海湖月度水位变化监测结果如图4(a)所示,少量缺失水位数据采用函数拟合方法补全。为验证本文所提取的卫星测高水位的有效性,将其与文献[18](2003—2020年)同期水位数据进行相关性检验

(图 4(b)), 结果验证了本研究水位变化结果的可靠性。

从月度水位变化时间序列(图 4(a))来看, 稳定扩张期平均水位为 3 194.73 m, 水位呈现稳定上升趋势, 趋势为 0.13 m/a; 快速扩张期平均水位为 3 196.60 m, 水位以 0.48 m/a 的趋势上升; 缓慢扩张期平均水位为 3 197.70 m, 湖泊扩张减缓, 趋势降至 0.04 m/a。从年际变化来看(图 4(c)), 2003—2023 年间青海湖水位总体呈现上升趋势, 共上升了 3.71 m, 上升趋势为 0.20 m/a。

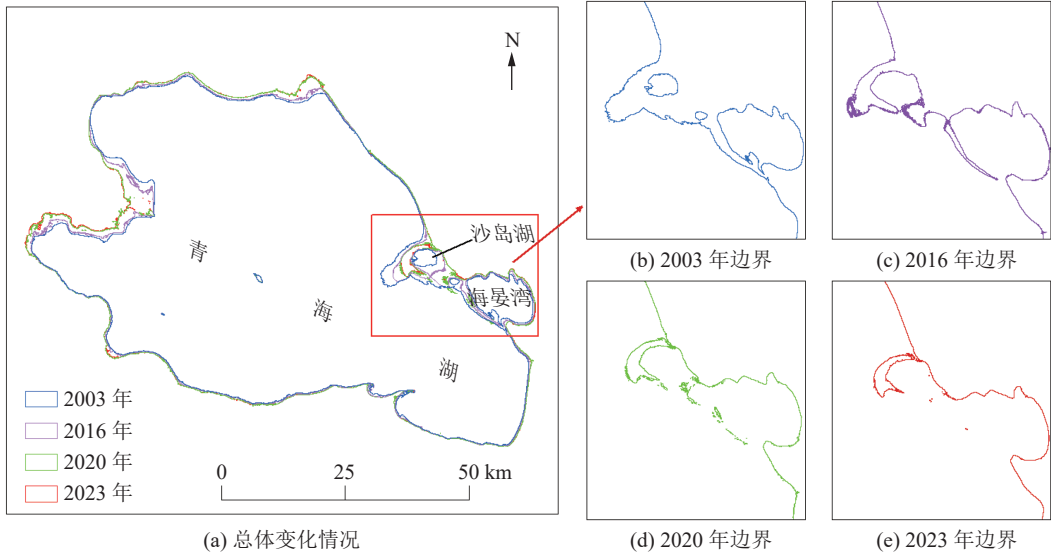
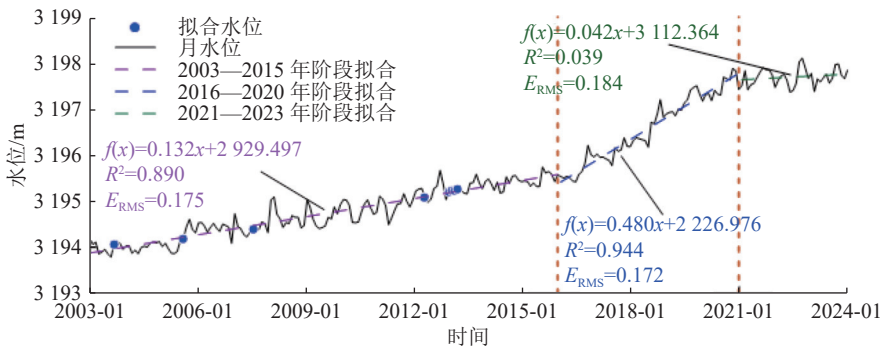
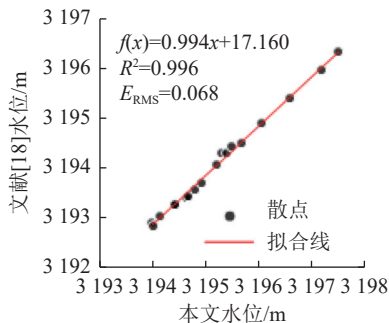


图 3 青海湖边界变化

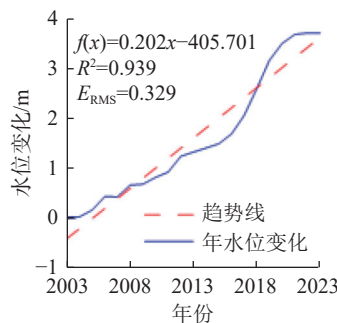
Fig. 3 Boundary changes of Qinghai Lake



(a) 水位月变化时间序列



(b) 与文献[18]水位相关性



(c) 水位年变化时间序列

图 4 2003—2023 年青海湖水位变化

Fig. 4 Changes in water level of Qinghai Lake from 2003 to 2023

3.3 水量变化

基于青海湖面积和水位数据,本文估算了2003—2023年青海湖月水量变化(图5(a)),可以看出青海湖月水量变化趋势与面积和水位的变化一致。研究时段内青海湖水量呈现连续递增趋势,总增长量为 16.18 km^3 ,增长趋势为 $0.91 \text{ km}^3/\text{a}$ (图5(b))。稳定扩张期水量增量为 6.05 km^3 ,增长趋势为 $0.57 \text{ km}^3/\text{a}$;快速扩张期水量增长量为 6.52 km^3 ,趋势为 $2.14 \text{ km}^3/\text{a}$,增长趋势明显加快;缓慢扩张期增长量为 1.69 km^3 ,趋势为 $0.19 \text{ km}^3/\text{a}$,增长趋势不明显。

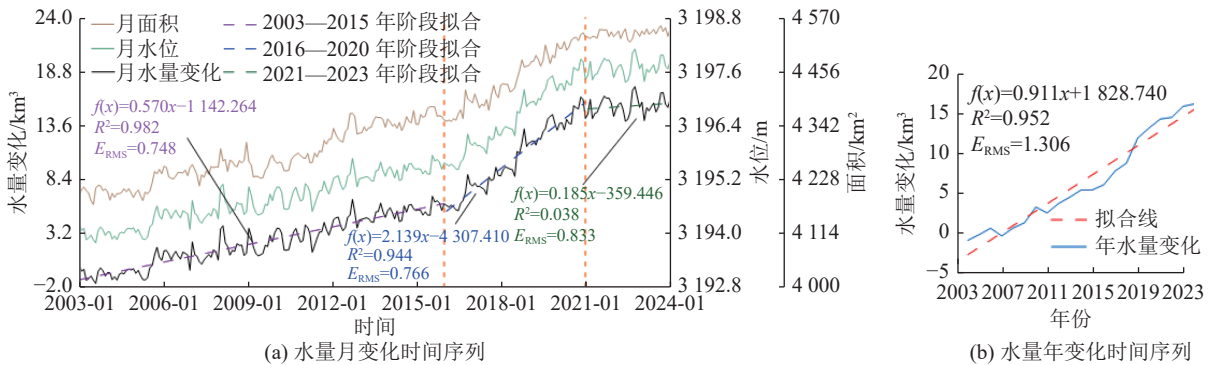


图5 2003—2023年青海湖水量变化

Fig. 5 Water storage changes of Qinghai Lake from 2003 to 2023

4 讨论

4.1 气候变化

由表1可知,青海湖年均水量变化与陆地降水的相关性最强,陆地降水形成径流补给青海湖,是湖水量增加的主要来源;湖面降水补给相对较少,相关系数次之。湖面蒸发直接导致湖水量减少,陆地蒸发通过消耗陆地水量间接影响湖水增幅,陆地/湖面温度影响陆地/湖面蒸(散)发,间接影响湖水量变化。上述因素对水量变化呈负相关,但影响较小,故相关系数为负,且相关系数较小。

表1 青海湖年水量变化与气候变化相关性

Table 1 Correlation between annual lake water storage change and annual climate change in Qinghai Lake

气候因子	陆地降水	湖面降水	湖面蒸发	陆地蒸散发	湖面气温	陆地气温
相关系数	0.786*	0.336	-0.170	-0.019	-0.175	-0.176

注: *表示在0.01级别(双尾),相关性显著。

由图6可知,2003—2023年青海湖流域内湖面和陆地的降水、蒸发、气温变化趋势一致,总体呈上升趋势。青海湖湖面多年平均降水量为 488.9 mm ,多年平均气温为 $0.91 \text{ }^\circ\text{C}$,多年平均蒸发量为 980.2 mm ,湖面净降水长期为负值(图6(a));陆地多年平均降水量为 449.0 mm ,多年平均气温为 $-4.12 \text{ }^\circ\text{C}$,多年平均蒸散发量为 331.4 mm ,陆地净降水为正值,能够实现对湖泊的补给(图6(b))。总体而言,青海湖水量补给来自于陆面径流和湖面降水,而湖面蒸发远大于降水,仅靠湖面降水无法维持湖泊水量平衡,湖水量增加更依赖于降水径流等外源补给。

4.2 冰川和冻土消融

青海湖流域的冰川主要分布在流域西北部的岗格尔肖合力冰川,尽管流域内冰川面积较小,但其产生

的融水仍能够给湖泊水量提供补给。图7表明, 气温上升对冰川变化呈现显著的负向效应, 流域内冰川面积呈现减少趋势, 累计减少约6.55 km², 形成融水约0.45 km³。青海湖流域广泛分布多年冻土和季节冻土, 受全球气候变暖影响, 冻土活动层厚度持续增加, 导致地下冰融水释放, 这些融水可能会汇入地表及地下径流补充湖泊水量^[13]。研究时段冻土面积总体呈减少趋势, 速率为-0.002 km²/a(图7)。依据公式(9)计算2003—2023年青海湖流域多年冻土和季节冻土消融量约分别为0.13、0.09 km³, 参照车彦军等^[27]永冻土和季节冻土区的径流系数分别取0.82和0.80, 计算冻土消融产生径流总量约0.22 km³。

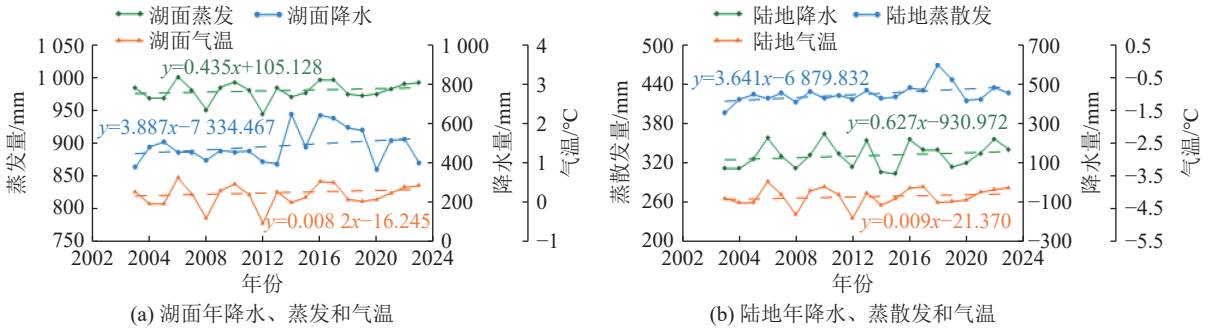


图6 2003—2023年青海湖流域气候因子变化趋势

Fig. 6 Trend of climatic factors in Qinghai Lake basin from 2003 to 2023

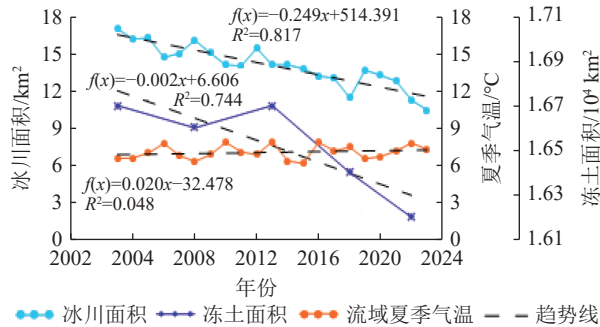


图7 青海湖流域冰川、冻土面积及夏季气温变化

Fig. 7 Changes in glacier, frozen ground areas and summer temperature in the Qinghai Lake basin

4.3 水量平衡各分量对湖泊水量变化的影响

为探究水量平衡分量对湖泊水量变化的影响。本文根据水量平衡方程计算3个时段及整个研究时段的降水径流、湖面降水、冻土融水、冰川融水以及湖面蒸发各平衡分量及其对总入湖水量的贡献, 结果如表2所示。从贡献率的计算结果可知, 降水量(湖面降水+降水径流)的增加主导了湖泊水量的增加, 此结论与Zhang等^[6]和王欣语等^[15]的研究一致。为检验估算结果合理性, 本文将模拟结果与前人研究成果进行对比(表3), 得到高度一致的结果。

本文还将同时期的模拟和实测的湖泊水量变化趋势进行了比较, 表2中4个时间段湖水量变化趋势模拟值和卫星监测值分别为0.35和0.57 km³/a、2.67和2.13 km³/a、0.18和0.19 km³/a、0.94和0.89 km³/a, 两者相符度较高, 但存在一定程度的差异。造成这一现象的原因一方面在于卫星实测结果存在一定误差; 另一方面水量平衡模拟各分量模型或观测本身存在误差, 且未能考虑地下水分量的影响, 在模拟中引入误差。

表 2 2003—2023 年各阶段水量平衡分量贡献

Table 2 Contribution of water balance components in each stage from 2003 to 2023

水量平衡分量	2003—2015年		2016—2020年		2021—2023年		2003—2023年		
	年均值/km ³	贡献率/%	年均值/km ³	贡献率/%	年均值/km ³	贡献率/%	年均值/km ³	贡献率/%	
降水径流	2.56	55.69	4.01	61.18	2.73	54.81	2.93	57.22	
湖面降水	1.98	43.11	2.48	37.80	2.18	43.82	2.13	41.57	
补给	冰川融水	0.02	0.33	0.03	0.39	0.03	0.61	0.02	0.39
	冻土融水	0.04	0.87	0.04	0.63	0.04	0.76	0.04	0.82
总入湖水量	4.60		6.56		4.98		5.13		
损耗	湖面蒸发	4.17	90.51	4.37	66.77	4.49	90.13	4.27	83.29

表 3 水量平衡分量贡献率与文献结果对比

Table 3 Comparison with previous studies of water balance components

时段	陆面径流	湖面降水	湖面蒸发	来源
2005—2016年	56.62	43.38	93.50	文献[28]
	56.66	43.34	87.60	本文
2004—2020年	55.68	38.29	81.59	文献[13]
	59.25	40.75	80.07	本文

注：本文陆面径流 = 降水径流 + 冰川融水 + 冻土融水。

5 结 论

本文结合多源遥感影像、卫星测高和水文气象数据探究了青海湖 2003—2023 年面积、水位以及水量的变化，定量分析了相关气象、水文因素对青海湖水量平衡的影响。主要结论如下：

(1) 2003—2023 年，青海湖经历了稳定扩张、快速扩张和缓慢扩张 3 个时段，面积扩张了 340.00 km²，水位上升了 3.72 m，水量增长了 16.18 km³。青海湖扩张最明显的区域主要为湖泊的西部、东部和北部。

(2) 陆面降水径流对青海湖总入湖水量增加的贡献最大，其次为湖面降水，冻土融水和冰川融水的贡献相对较小，降水量的增加主导了湖泊水量的增加。湖面蒸发是唯一损耗量，对总入湖水量的损耗率为 83.29%。

参考文献：

- [1] WOOLWAY R I, KRAEMER B M, LENTERS J D, et al. Global lake responses to climate change[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(8): 388-403.
- [2] 王欣, 连文皓, 魏俊锋, 等. 青藏高原水资源现状与问题[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 812-826. (WANG X, LIAN W H, WEI J F, et al. Status and problems of water resources on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(5): 812-826. (in Chinese))
- [3] RAN Q W, AIRES F, CIAIS P, et al. The status and influencing factors of surface water dynamics on the Qinghai-Tibet Plateau during 2000—2020[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1-14.
- [4] 孙明智, 刘新, 汪海洪, 等. 多源卫星测高数据监测拉昂错 1992 年—2020 年水位变化[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 126-137. (SUN M Z, LIU X, WANG H H, et al. Monitoring lake level change in La-ang Co from 1992 to 2020 using multi-altimeter data[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(1): 126-137. (in Chinese))
- [5] WANG Y, XIN Z H, ZHANG C, et al. Revealing lake dynamics across the Amur River basin over the past two decades using multi-source

- remote sensing datasets[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 55: 101928.
- [6] ZHANG G Q, YAO T D, SHUM C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5550-5560.
- [7] 李振南, 雷伟伟, 王一帆, 等. 基于多源卫星测高数据的青海湖水位变化研究[J]. *测绘科学*, 2023, 48(5): 140-151. (LI Z N, LEI W W, WANG Y F, et al. Water level variation of Qinghai Hu based on multi-source satellite altimetry data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48(5): 140-151. (in Chinese))
- [8] WANG J B, WANG J Y, CHEN S D, et al. Study on the variations in water storage in Lake Qinghai based on multi-source satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(7): 1746.
- [9] YANG L, WANG L C, ZHANG M, et al. Variation of water body in Dongting Lake from in situ measurements and MODIS observations in recent decades[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2021, 14(8): 959-984.
- [10] 叶许春, 岳恩馨, 李相虎, 等. 基于淹水面积构建的鄱阳湖水文干旱定量表征及变化特征[J]. *水科学进展*, 2025, 36(2): 320-331. (YE X C, YUE E X, LI X H, et al. Quantification and variation of hydrological drought in the Poyang Lake based on the constructed inundation area dataset[J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(2): 320-331. (in Chinese))
- [11] XU F L, ZHANG G Q, WOOLWAY R I, et al. Widespread societal and ecological impacts from projected Tibetan Plateau lake expansion[J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17(6): 516-523.
- [12] 郭丰杰, 李婷, 季民. 2000—2019 年青海湖面积时序特征分析及预测[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(2): 740-748. (GUO F J, LI T, JI M. Time series analysis and prediction of Qinghai Lake area from 2000 to 2019[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(2): 740-748. (in Chinese))
- [13] ZHANG Z F, CONG Z T, GAO B, et al. The water level change and its attribution of the Qinghai Lake from 1960 to 2020[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 52: 101688.
- [14] 骆卓然, 刘家宏, 张尚弘, 等. 气候变化对青海湖水位的影响及机理分析[J]. *水力发电学报*, 2024, 43(3): 1-13. (LUO Z R, LIU J H, ZHANG S H, et al. Influence of climate change on Qinghai Lake stage and its mechanism analysis[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(3): 1-13. (in Chinese))
- [15] 王欣语, 高冰. 青海湖水量平衡变化及其对湖水位的影响研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(10): 60-70. (WANG X Y, GAO B. Study of water balance change and its influence on water stage in the Qinghai Lake[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(10): 60-70. (in Chinese))
- [16] PENG S Z, DING Y X, LIU W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [17] 杨针娘, 刘新仁, 曾群柱, 等. 中国寒区水文[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 54-121. (YANG Z N, LIU X R, ZENG Q Z, et al. Cold region hydrology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 54-121. (in Chinese))
- [18] ZHANG G Q, DUAN S Q. Lakes as sentinels of climate change on the Tibetan Plateau[J]. *All Earth*, 2021, 33(1): 161-165.
- [19] MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [20] 龙笛, 李雪莹, 李兴东, 等. 遥感反演 2000—2020 年青藏高原水储量变化及其驱动机制[J]. *水科学进展*, 2022, 33(3): 375-389. (LONG D, LI X Y, LI X D, et al. Remote sensing retrieval of water storage changes and underlying climatic mechanisms over the Tibetan Plateau during 2000—2020[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 375-389. (in Chinese))
- [21] 陈健茹, 徐佳, 王冬梅. 基于多源卫星数据的高邮湖长时序水位变化监测[J]. *人民长江*, 2024, 55(1): 120-126. (CHEN J R, XU J, WANG D M. Long time series monitoring of water level change in Gaoyou Lake based on multi-source satellite data[J]. *Yangtze River*, 2024, 55(1): 120-126. (in Chinese))
- [22] TAUBE C M. Three methods for computing the volume of a lake[C]//SCHNEIDER J C. *Manual of Fisheries Survey Methods II: With Periodic Updates*. Ann Arbor: Michigan Department of Natural Resources, 2000: 175-179.
- [23] DOZIER J. Spectral signature of alpine snow cover from the landsat thematic mapper[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 28: 9-22.
- [24] 刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 227-233. (LIU S Y, SHEN Y P, SUN W X, et al. Glacier variation since the maximum of the little ice age in the Western Qilian Mountains, Northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 227-233. (in Chinese))
- [25] XUE Z L, ZHAO S M, ZHANG B. Study on soil freeze-thaw and surface deformation patterns in the Qilian Mountains alpine permafrost

- region using SBAS-InSAR technique[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(23): 4595.
- [26] WANG L X, ZHAO L, ZHOU H Y, et al. Contribution of ground ice melting to the expansion of Selin Co (lake) on the Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 2022, 16(7): 2745-2767.
- [27] 车彦军, 张明军, 陈亚宁, 等. 近 30 a 东昆仑阿牙克库木湖水量变化及其补给关系研究 [J]. 干旱区地理, 2024, 47(7): 1116-1126. (CHE Y J, ZHANG M J, CHEN Y N, et al. Changes in water volume of Ayakkum Lake in the Eastern Kunlun Mountains and its replenishment relationship in the last 30 years[J]. *Arid Land Geography*, 2024, 47(7): 1116-1126. (in Chinese))
- [28] FANG J M, LI G J, RUBINATO M, et al. Analysis of long-term water level variations in Qinghai Lake in China[J]. *Water*, 2019, 11(10): 2136.

Hydrological regime change of Qinghai Lake from 2003 to 2023 and its response to climate change*

NONG Aile¹, XIANG Longwei^{1,2}, WANG Hansheng³, CHEN Zugang², LI Guoqing², DENG Fan¹

(1. *School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China*; 2. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*; 3. *Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China*)

Abstract: Qinghai Lake is the largest endorheic lake on the Qinghai-Tibet Plateau. Research on the hydrological regime changes of Qinghai Lake holds great significance for regional water resource management and ecological environment protection. This study comprehensively utilized multi-source remote sensing images, satellite altimetry data, and hydro-meteorological data to explore the variation trends of Qinghai Lake's area, water level, and water volume from 2003 to 2023, and quantitatively analyze the contribution of each component to the water balance of Qinghai Lake. The results showed that: from 2003 to 2023, the increasing trends of Qinghai Lake's area, water level, and water volume were 18.65 km²/a, 0.20 m/a, and 0.91 km³/a respectively, which can be roughly divided into three stages of stable expansion, rapid expansion, and slow expansion; among the water balance components, the contribution rates of terrestrial precipitation runoff, lake surface precipitation, permafrost meltwater, and glacial meltwater to the total inflow water volume were 57.2%, 41.6%, 0.8%, and 0.4% respectively. Among these, the increase in terrestrial precipitation runoff and lake surface precipitation were the dominant factors leading to the changes in the hydrological regime of Qinghai Lake.

Key words: hydrological regime changes; climate change; water balance; multi-source data; Qinghai Lake

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42004007) and the National Earth Observation Data Center of China (No. NODAOP2024001).