

杨娇娇, 薛鑫苑, 朱露露, 等. 1972年以来羊卓雍错流域湖泊水域面积变化特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 151-161. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.011

YANG Jiaojiao, XUE Xinyuan, ZHU Lulu, et al. Characteristics of variation of lake water area in Yamzho-Yumco basin since 1972 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 151-161. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.011

# 1972年以来羊卓雍错流域湖泊水域面积变化特征

杨娇娇<sup>1</sup>, 薛鑫苑<sup>1</sup>, 朱露露<sup>1</sup>, 吴红波<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. 陕西理工大学 地理科学系, 陕西 汉中 723000; 2. 雄安空天信息研究院, 河北 雄安新区 070001;  
3. 西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127;  
4. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

**摘要:** 【目的】青藏高原分布着众多内陆湖泊, 湖泊水域面积变化能够指示区域气候变化和湖泊演化趋势。为了分析羊卓雍错流域内湖泊水域面积的变化趋势与特征, 【方法】选取 1972—2023 年期间的 Landsat 卫星影像, 采用归一化水体指数方法提取羊卓雍错、巴纠错、空母错、沉错、多错、普莫雍错的水域面积信息, 重建近 50 a 各湖泊面积的日变化和年变化序列。借助 GPS 实地观测数据, 评估了湖泊水域边界识别中的总体误差。基于流域附近的气象站数据和线性趋势分析, 探讨湖泊水域面积变化的驱动因素。【结果】结果显示: 1972—2023 年期间羊卓雍错、空母错、沉错、巴纠错的水域面积呈萎缩趋势, 普莫雍错和多错的水域面积呈扩张趋势, 普莫雍错的西部边界扩张较为显著。与 1972 年年均水域面积相比, 2023 年羊卓雍错、空母错、巴纠错、沉错的年均水域面积分别缩减了 82.72 km<sup>2</sup>、2.2 km<sup>2</sup>、2.0 km<sup>2</sup>、0.9 km<sup>2</sup>; 普莫雍错、多错的年均水域面积分别扩张了 8.3 km<sup>2</sup>、0.4 km<sup>2</sup>。【结论】结果表明: 根据台站气象要素的线性分析, 1972—2023 年期间年均气温、年降水量均呈增加趋势, 但是年降水量增加不明显; 相对湿度和年蒸发量呈减少趋势, 但相对湿度减少不明显。总体上, 羊卓雍错流域的区域气候正在处于“暖湿化”状态, 而湖泊水域表面蒸发和冰雪融水对湖泊水域面积变化的作用机理不可忽视。

**关键词:** 卫星遥感; 湖泊面积; 空间分析; 不确定性; 时变序列; 时空分布; 降水; 气候变化; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P237; TV211.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0151-11



听语音  
聊科研

## Characteristics of variation of lake water area in Yamzho-Yumco Basin since 1972

YANG Jiaojiao<sup>1</sup>, XUE Xinyuan<sup>1</sup>, ZHU Lulu<sup>1</sup>, WU Hongbo<sup>1,2,3,4</sup>

- (1. Department of Geographical Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, Shaanxi, China; 2. Xiong'an Aerospace Information Research Institute, Xiong'an New Area 070001, Hebei, China; 3. Shaanxi Key of Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 4. CAS Center for

收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2025-04-26; 录用日期: 2025-04-28; 网络出版日期: 2025-05-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130516); 国家自然科学基金青年项目(41601067)

作者简介: 杨娇娇(2003—), 女, 学士, 主要从事地理信息技术应用研究。E-mail: 2652759620@qq.com

通信作者: 吴红波(1984—), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事卫星测高、冰雪遥感和地理信息技术应用研究。E-mail: wuhongbo12366@sina.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

**Abstract** [Objective] The mass inland lakes were distributed on the Xizang Plateau, and both the regional climate change and lake evolution trends could be indicated by changes of lake water area. The trend and characteristics of lake water area change in the Yamzho-Yumco basin was analyzed in the period of 1972—2023. [Methods] These Landsat satellite images were used to extract on the water area of Yamzho-Yumco, Bajiu Co, Kongmu Co, Chen Co, Duo Co, and Puma Yumco, based on the normalized difference water index method. The variation series of daily and annual lake water area were reconstructed in the past 50 years. The GPS measured data were applied to evaluate on the overall error of lake water boundaries. These driving factors of lake water area change were discussed on the data of meteorological stations near the basin, based on linear trend analysis. [Results] In the period of 1972—2023, the lake water area of Yamzho-Yumco, Kongmu Co, Chen Co and Bajiu Co were shrinking. In the meantime, the lake water area of Puma Yumco and Duo Co were expanding. The expansion on the western boundary of Puma Yumco was more obvious. Compared with the average annual water area in 1972, the average annual water areas of Yamzho-Yumco, Kongmu Co, Bajiu Co and Chen Co had shrunk by 82.72 km<sup>2</sup>, 2.2 km<sup>2</sup>, 2.0 km<sup>2</sup>, 0.9 km<sup>2</sup> in 2023, respectively. The average annual water areas of Puma Yumco and Duo Co had expanded by 8.3 km<sup>2</sup> and 0.4 km<sup>2</sup>, respectively. [Conclusion] According to the linear analysis, the meteorological element data of the station showed that the average annual temperature and annual precipitation had an increasing tend from 1972 to 2023, but the annual precipitation did not increase significantly. At the same time, the relative humidity and annual evaporation had a decreasing tend, but the relative humidity did not decrease significantly. Overall, the regional climate in Yamzho-Yumco basin was in the warm and humid state, and the mechanism of lake water surface evaporation and glacial-snow meltwater could not be ignored in the process of lake water area change.

**Keywords:** satellite remote sensing; lake water area; spatial analysis; uncertainty; time-varying series; spatial-temporal distribution; precipitation; climate change; influencing factors

## 0 引言

湖泊作为地表圈层的自然综合体,是陆地水圈的重要组成部分<sup>[1]</sup>,也是人类生活中不可缺少的自然资源<sup>[2]</sup>。湖泊具有调节河川径流、发展农田灌溉、提供工业和饮用的水源,改善区域生态环境等多种功能<sup>[3]</sup>。影响湖泊面积变化的主要因素包括自然因素和人为因素<sup>[4]</sup>,湖泊水域的扩张与萎缩可直接反映出区域内气候环境和人类活动的变化状态,并逐渐受到学者的广泛关注<sup>[5]</sup>。目前,遥感技术作为获取地球表层和环境变化数据的重要手段,卫星遥感能够监测地表水体的面积、岸线<sup>[6]</sup>、水位和水质等变化<sup>[7]</sup>,为水资源合理开发和利用提供数据支持。海量的卫星遥感数据集不仅可以更系统性地分析湖泊水域面积的变化趋势,也可以分析湖泊水域面积变化的人为和自然因素的驱动及其内在规律<sup>[8]</sup>。基于卫星遥感影像提取地表水体信息的方法有:人工目视解译、单波段阈值法、分类器法、面向对象法、深度学习法以及其他方法<sup>[9]</sup>。基于光谱特征提取水体信息的方法有:单波段阈值法、谱间关系法和水体指数法。单波段阈值法是根据水体在近红外波段较强的吸收率,区分水体与非水体地物,原理简便且易于操作,然而该方法

适用于地物信息细节相对较少且目标信息较为突出的情况,在地表物体类型复杂时该方法所提取的结果常常夹杂着大量的噪声<sup>[10]</sup>。谱间关系法<sup>[11]</sup>主要利用水体与其他不同地物的光谱差异提取水体信息,其识别精度和稳定性有所提升,但是当非水体和水体之间的光谱差异较小时,提取的水体信息会有漏分和错分现象。水体指数法<sup>[12]</sup>是基于水体在可见光的近红外、绿色波段处的反射率存在差异,利用近红外、绿色波段的比值运算模型,增强水体信息抑制其他背景信息,很大程度上可提高水体像元分类精度,而被大多数研究学者广泛应用。

青藏高原平均海拔超过4 000 m,湖泊众多,是东亚、东南亚和南亚许多河流的发源地。青藏高原的湖泊与其他地区内陆湖相比,受到人类的干扰较少,湖泊变化可直接反映自然条件下的区域气候变化<sup>[13]</sup>。在全球气候变暖的背景下,高原生态环境脆弱,少量湖泊面积处于萎缩状态,水质咸化,湖泊水位下降,一些水域面积较小的湖泊也逐渐消亡<sup>[14]</sup>。青藏高原湖泊面积的变化以改变下垫面条件的方式影响物质、能量和水汽交换,进而影响地区生态系统的平衡和局部小气候<sup>[15]</sup>。同时,受环境急剧变化的影响,青藏高原地区冰川融化、冻土退化等速率加速,正在影响

着周边湖泊水域面积、水位、水储量、岸线变化<sup>[16]</sup>。

羊卓雍错流域包含了湖泊、草甸、冻土、冰川、积雪、荒地、林地等多种自然景观为一体的研究区, 受人类活动的影响较小, 其中空母错、沉错、巴纠错、普莫雍错基本处于自然状态下, 也是研究气候变化和水资源变化的理想场所。近年来, 一些学者对羊卓雍错的水域面积变化及其趋势进行研究。边多等<sup>[17]</sup>根据卫星遥感影像分析得出 1975—2006 年近 30 年来羊卓雍错流域内湖泊面积呈现萎缩趋势, 其中羊卓雍错面积下降的主要原因之一是温度的升高。除多等<sup>[18]</sup>基于 RS 和 GIS 空间分析方法系统地研究了 1972—2010 年羊卓雍错水域面积变化呈波动式减少, 降水偏少是羊卓雍错水域面积萎缩的主因。张嘉琪等<sup>[19]</sup>基于水体指数法和遥感影像, 也发现羊卓雍错水域面积变化与降水量呈正相关。1995 年前青藏高原的大部分湖泊水域呈现萎缩状态, 1995 年之后青藏高原湖泊水域面积和数据均呈增加趋势<sup>[20]</sup>。白玛央宗等<sup>[21]</sup>发现 1972—2018 年玛旁雍错和拉昂错呈现萎缩趋势, 两湖的萎缩与扩张年际变化趋势一致。赵永利<sup>[22]</sup>分析了 1977—2012 年羊卓雍错水域面积变化, 湖泊水域范围经历了先缩小后增大再加速萎缩的过程。总体上, 羊卓雍错流域湖泊面积变化在较长时

段研究中选取的年份数量偏少, 缺少对短时段内湖泊面积连续变化情况的研究, 系统性量化分析湖泊面积变化趋势及影响因素仍十分缺乏。为此, 利用 1972—2023 年 Landsat 卫星影像和观测资料开展研究, 基于归一化水体指数方法提取羊卓雍错、空母错、巴纠错、多错、沉错、普莫雍错的水域面积, 重建各湖泊水域面积的日变化、年变化序列, 探讨影响水域面积变化的驱动因素, 旨在为羊卓雍错流域的气候变化、生态环境保护、水资源管理等研究提供理论参考。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究区概况

羊卓雍错流域位于青藏高原南部, 喜马拉雅山脉北麓, 位于  $90^{\circ}08'E-91^{\circ}45'E$ ,  $28^{\circ}25'N-29^{\circ}12'N$  (见图 1)。湖区水域面积  $638 \text{ km}^2$ , 湖面海拔  $4441 \text{ m}$ , 平均深度约  $23.6 \text{ m}$ , 蓄水量约  $16 \text{ km}^3$ , 流域面积  $6100 \text{ km}^2$ , 属于内陆封闭湖泊。流域四周高山环绕, 属藏南山地灌丛草原半干旱气候, 流域年均温  $2.9^{\circ}\text{C}$ 。年均降水  $363.4 \text{ mm}$ , 高山区终年积雪, 湖水以降水补给为主<sup>[23]</sup>, 占流域面积 2% 的冰川, 每年以融水形式补给湖泊, 容水量约占总补给量的 16%。流域内的主要支流有扎布曲、甫曲、麻雀曲、

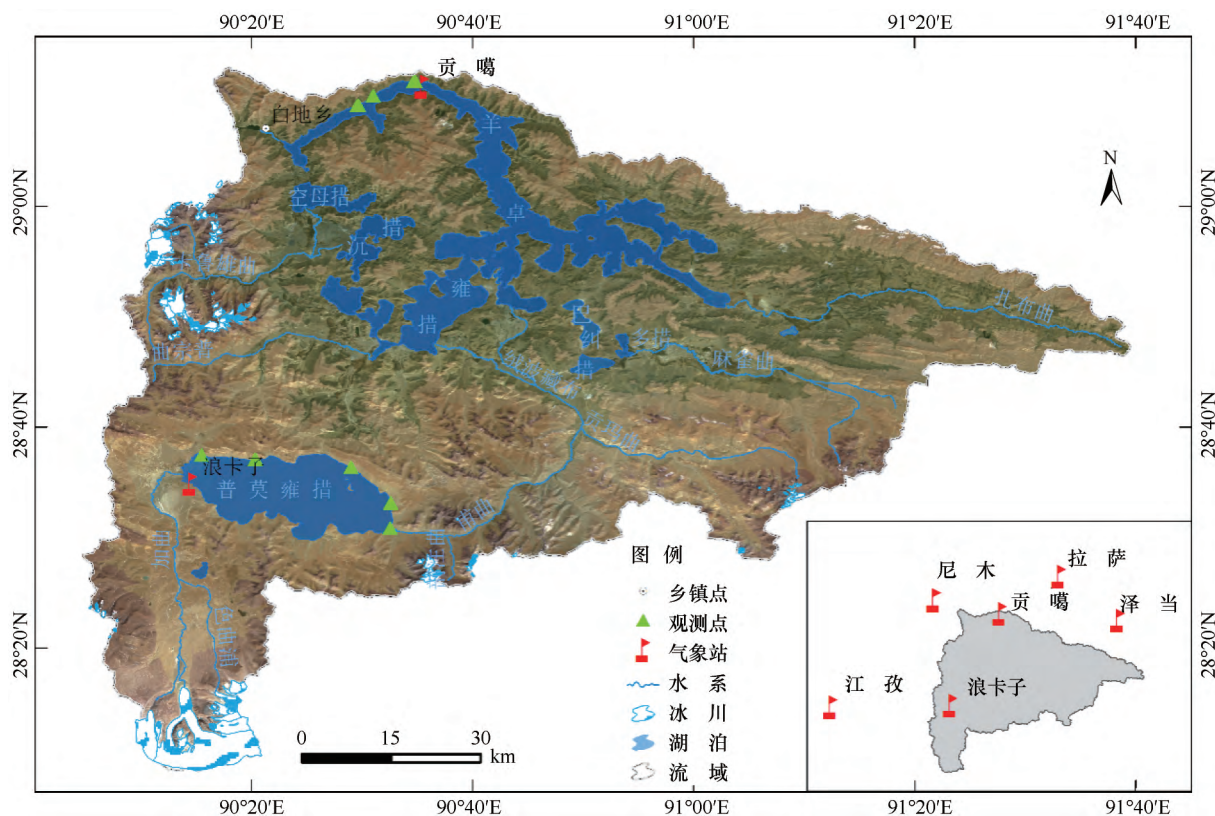


图 1 羊卓雍错流域的地理位置

Fig. 1 The geographical location of Yamzho Yumco basin

贡玛曲、绒波藏布、加曲、卡鲁雄曲等, 主要湖泊有空母错、沉错、巴纠错、多错、普莫雍错等。在历史上曾为外流湖, 湖水曾通过流域内西北处白地乡附近的墨曲流入雅鲁藏布江, 后来由于气候干旱、水量减少以及河道被山洪冲积物堵塞, 才与雅鲁藏布江断流, 沉错、空母错、巴纠错等小湖泊也相继分离。目前, 羊卓雍错水域的形状不规则, 呈树枝状分布, 与空母错和沉错有水力联系。当普莫雍错水位较高时, 通过排水通道流向羊卓雍错, 但是与巴纠错和多错无水力联系<sup>[18]</sup>。

## 1.2 Landsat 卫星数据

1972 年 10 月—2023 年 12 月期间的陆地卫星 Landsat MSS/TM/ETM/OLI 影像, 用于提取羊卓雍错湖泊水域面积, 从美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 网站 (URL: <http://earth-explorer.usgs.gov>) 下载, 共计 458 景; 其中, 1972—1978 年期间 MSS 影像 15 景, 1987—2011 年期间 TM 影像 225 景, 1999—2013 年期间 ETM 影像 50 景, 2013—2023 年期间 OLI 影像 168 景。由于 MSS 影像与 TM、ETM、OLI 影像的空间分辨率、辐射率的差异, 在提取湖泊水域面积前, 利用 ENVI 软件对 MSS 原始图像进行地理配准、辐射定标、大气校正等预处理; 其次, 2003—2013 年期间 ETM 影像存在条带问题, 还需进行去除条纹; 再次, 利用绿色和近红外波段处的水体反射率的差异, 基于归一化水体指数计算出水体指数; 最后, 根据水体指数的阈值, 识别出水体像元, 并提取水域边界位置和水域面积, 借助北斗 GPS 采集仪的控制点对提取的岸线位置进行误差分析。

## 1.3 气象数据

羊卓雍错湖泊附近的尼木、贡嘎、拉萨、泽当、江孜和浪卡子站气象逐年观测数据, 用于分析流域尺度上的气象要素变化趋势。1972—2023 年期间的降水、气温、相对湿度和直径为 20 cm 的蒸发皿的蒸发量等气象要素资料, 来源于中国气象数据网 (URL: <http://data.cma.cn/>)。

## 1.4 研究方法

### 1.4.1 湖泊信息提取

水体指数法可以增强水体信息, 具有计算快捷、精度较高、通过有效方式降低冰雪对于水体信息提取的影响等特点<sup>[24]</sup>。采用归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI) 进行湖泊水域面积变化分析。具体的水体信息提取方法为: 在 ENVI 5.3 软件中选取遥感影像对应的绿光波段和近红外波段插入 NDWI 计算公式并进行波段运算, 通过多次目视判

读确定提取水体阈值, 最终在 ArcGIS 中计算羊卓雍错流域湖泊面积。归一化水体指数 NDWI 计算式为<sup>[25]</sup>

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

式中,  $\rho_{Green}$  为绿光波段地物反射率, 对应 MSS 影像的第 4 波段, 对应 TM/ETM 影像的第 2 波段, 对应 OLI 影像的第 3 波段;  $\rho_{NIR}$  为近红外波段地物反射率, 对应 MSS 影像的第 6 波段, 对应 TM/ETM 影像的第 4 波段, 对应 OLI 影像的第 5 波段。在水体解译结果中, 当  $I_{NDWI}$  值大于 0.2 时, 像元为水体, 当  $I_{NDWI}$  值小于 0.2 时, 像元为非水体。 $I_{NDWI}$  阈值取 0.2 时, 湖水在绿光波段的反射率高, 近红外波段的反射率低, 水体的分割效果最好。

### 1.4.2 湖泊水域边界的误差

除了 Landsat 影像在几何校正过程中, 系统性的配准偏差可以纠正。湖泊水域边界的总体误差还包括 GPS 控制点的系统定位误差和波段计算中像元重采样过程所引起的随机误差。在水体指数计算中, 像元重采样的离散化和混合像元的敏感度在同一水域也会有所差异。因此, 湖泊水域边界的总体误差  $D_{error}$  计算式为

$$D_{error} = \sqrt{\frac{\sum^n d^2 + \sum^n l^2}{2 \times n}} \quad (2)$$

式中,  $d$  为 GPS 采集仪的系统定位误差 (m);  $l$  为水体指数计算过程中的随机误差, 将湖泊水域边界至控制点的最小距离作为随机误差 (m);  $n$  为 GPS 控制点的样本数。

### 1.4.3 线性趋势分析

线性趋势分析法将逐年降水量、平均气温、相对湿度和蒸发量等变化趋势用一元线性方程表示, 其气象要素变化率  $X_i$  计算式为

$$X_i = A + B \times t_i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

式中,  $t_i$  为气象要素的年代序号;  $A$  为回归常数,  $B$  为斜率,  $B < 0$  表示要素随时间呈下降态势,  $B > 0$  表示要素随时间呈上升趋势,  $B = 0$  表示没有变化趋势。

## 2 结果与分析

### 2.1 湖泊边界误差分析

2022 年 7 月利用 GPS 采集仪在羊卓雍错和普莫雍错湖泊水域边界, 分别获取 28 个和 45 个控制点, 共计 73 个。选取 2022 年 7 月 17 日 Landsat 8 卫星影像提取的水域边界进行分析, 羊卓雍错和普莫雍错水

域边界的定位误差分别为 1.86 m、1.92 m; 随机误差分别为 16.20 m、13.78 m, 如图 2 所示。根据总体误差的计算式(2)求得, 羊卓雍错和普莫雍错的总体误差分别为 11.80 m、11.52 m, 水域边界误差所对应的水域面积分别占到羊卓雍错和普莫雍错水域面积的 1.08%、0.38%, 能够满足湖泊水域面积估算的精度。除了 Landsat 卫星影像的几何校正, 重采样过程中像元离散化, 水体指数计算中混合像元的敏感度和 GPS 控制点的定位误差存在系统性偏差, 能够有效地纠正, 但是水域边界处的地物变迁也会产生随机误差。

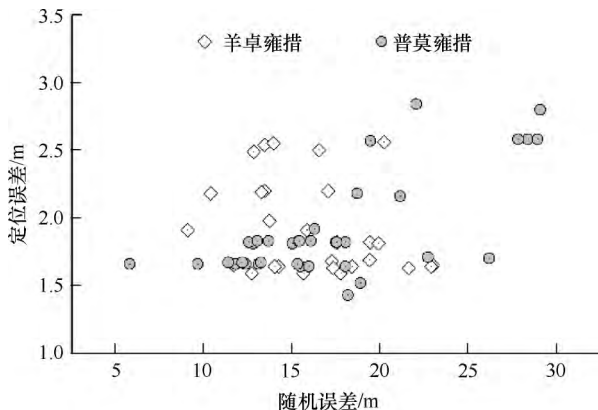


图 2 水域边界的控制点定位误差和随机误差的散点图  
Fig. 2 Scatter plot of positioning error and random error of control points at the boundary of lake water

## 2.2 湖泊面积日变化

流域内羊卓雍错、空母错、巴纠错、多错、沉错、普莫雍错的水域面积日变化序列如图 3 所示。由图 3(a)可知, 1972—2023 年羊卓雍错的水域面积日变化经历“萎缩—快速扩张—快速萎缩—缓慢萎缩”变化过程。1972 年 10 月—1998 年 1 月水域面积萎缩, 与 1972 年 10 月 18 日水域面积为 625.1 km<sup>2</sup> 相比, 1998 年 1 月 4 日水域面积缩小为 567.2 km<sup>2</sup>, 水域面积缩减了 57.9 km<sup>2</sup>; 1999 年 11 月—2004 年 11 月水域面积出现扩张, 2004 年 11 月 20 日水域面积扩大至 607.91 km<sup>2</sup>, 羊卓雍错的水域面积达到最大峰值; 2004 年 12 月—2008 年 11 月水域面积迅速萎缩, 2009 年 11 月—2023 年 12 月水域面积总体变化幅度较小, 2012 年 11 月 18 日羊卓雍错水域的日均面积出现最小值, 为 526.30 km<sup>2</sup>。

由图 3(b)可知, 1972—2023 年空母错水域面积总体呈萎缩趋势, 水域面积波动幅度较小。1991 年 11 月 17 日空母错的水域面积出现最大值, 为 39.78 km<sup>2</sup>。

由图 3(c)可知, 1972—2023 年巴纠错水域面积

日变化, 经历“萎缩—快速扩张—快速萎缩—缓慢萎缩”变化过程。1972 年 10 月—1976 年 12 月水域面积呈现萎缩, 与 1972 年 10 月 18 日水域面积为 25.9 km<sup>2</sup> 相比, 1976 年 12 月 17 日水域面积缩小为 21.19 km<sup>2</sup>, 减少了 4.71 km<sup>2</sup>, 湖泊水域面积出现最小值; 1977 年 1 月—1997 年 12 月水域面积恢复至 25.39 km<sup>2</sup>; 1998 年 9 月—2008 年 12 月水域面积再扩张, 2004 年 10 月 19 日水域面积达到最大值, 为 36.37 km<sup>2</sup>; 2009 年 2 月—2015 年 12 月水域面积迅速萎缩, 2016 年 10 月—2023 年 12 月水域面积总体变化幅度较小。

由图 3(d)可知, 1972—2023 年多错水域日均面积整体上经历“扩张—萎缩”变化过程。1972 年 10 月—1992 年 3 月湖泊面积萎缩, 1972 年 10 月 18 日湖泊面积为 4.35 km<sup>2</sup>, 相比 1992 年 3 月 24 日湖泊面积为 1.74 km<sup>2</sup>, 减少了 2.61 km<sup>2</sup>; 1993 年 2 月—2003 年 12 月湖泊面积出现扩张, 2003 年 12 月 20 日湖泊水域面积达到最大值 7.08 km<sup>2</sup>; 2007 年 4 月—2023 年 12 月湖泊面积总体上出现萎缩。

由图 3(e)可知, 1972—2023 年沉错湖泊面积变化经历“扩张—萎缩”变化过程。1972 年 10 月—2003 年 11 月湖泊面积增加, 时段内面积波动幅度较大, 且 2003 年 4 月 16 日湖泊面积出现最大峰值, 湖泊面积为 42.8 km<sup>2</sup>; 2003 年 11 月—2023 年 12 月湖泊面积总体呈萎缩趋势。

由图 3(f)可知, 1972—2023 年普莫雍错湖泊水域日均面积总体呈扩张趋势, 且 1994 年后湖泊水域面积出现持续性的扩张。

## 2.3 湖泊面积年变化

由图 4(a)可知, 1972—2023 年期间羊卓雍错湖泊水域面积总体呈萎缩趋势, 年均面积从 625.15 km<sup>2</sup> 减小至 542.43 km<sup>2</sup>, 面积减少了 82.72 km<sup>2</sup>。其中, 1996—2004 年湖泊年均面积一直处于增加的趋势, 2005—2012 年湖泊面积迅速减小, 2013—2023 年羊卓雍错湖泊水域面积略有减少。由图 3(b)可知, 1972—2023 年空母错年均水域面积总体呈减小趋势, 面积从 38.4 km<sup>2</sup> 缩减至 36.20 km<sup>2</sup>, 水域面积减少 2.2 km<sup>2</sup>。

由图 4(c)可知, 1972—2023 年巴纠错的年均水域面积总体呈减小趋势, 面积从 25.9 km<sup>2</sup> 减小至 23.94 km<sup>2</sup>, 面积减少了 2.0 km<sup>2</sup>。其中 1997—2003 年湖泊水域年均面积持续增加, 2004—2015 年湖泊水域面积迅速萎缩, 2016—2023 年巴纠错水域面积略有减少。

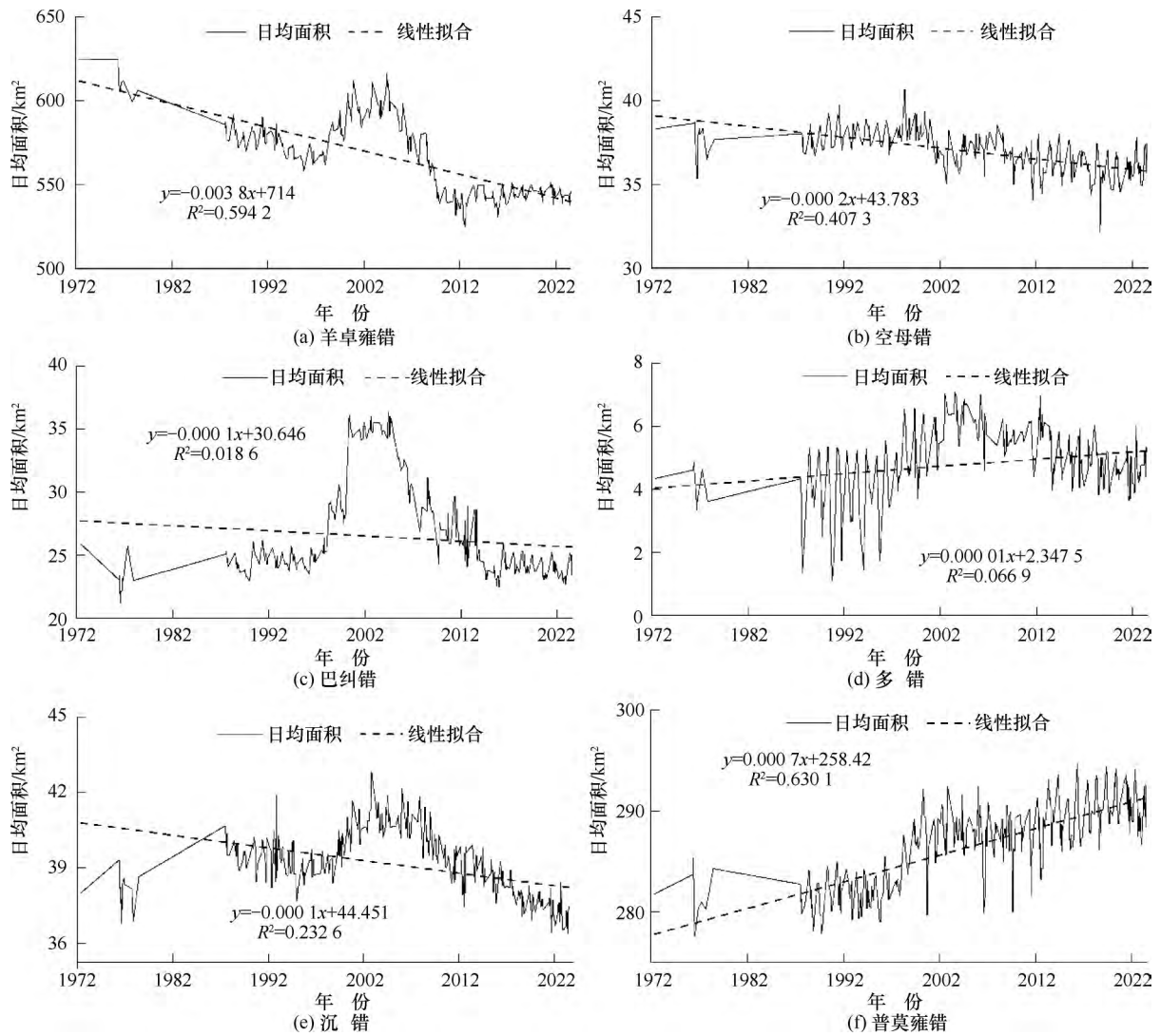


图 3 1972—2023 年湖泊水域面积日变化

Fig. 3 Variation of daily lake water area from 1972 to 2023

由图 4(d) 可知, 1972—2023 年多错年均水域面积总体呈扩张趋势, 面积从  $4.35 \text{ km}^2$  增大至  $4.78 \text{ km}^2$ , 面积增大了  $0.43 \text{ km}^2$ 。其中 1996—2003 年水域面积扩张, 2004—2016 年水域面积萎缩, 2017—2023 年湖泊面积略有扩张。

由图 4(e) 可知, 沉错湖泊水域总体上萎缩, 从 1972 年  $38.02 \text{ km}^2$  减小至 2023 年  $37.15 \text{ km}^2$ , 经历“扩张—萎缩”变化过程。1972—2002 年, 沉错水域面积扩张了  $3.4 \text{ km}^2$ 。2003—2023 年沉错水域持续萎缩, 湖泊面积减小了  $4.3 \text{ km}^2$ 。

由图 4(f) 可知, 1972—2023 年普莫雍错水域面积总体呈扩张趋势, 同时, 1972—1998 年普莫雍错水域面积波动幅度较小, 水域范围较为稳定。1999—2023 年, 普莫雍错湖泊水域面积迅速扩张, 尤其是 1999—2002 年扩张速率最大。与 1972 年 10 月

Landsat 影像获取的湖泊水域面积为  $281.8 \text{ km}^2$  相比, 2023 年普莫雍错水域平均面积增加了  $8.3 \text{ km}^2$ 。

## 2.4 湖泊岸线变化

选取羊卓雍错、空母错、巴纠错、多错、沉错、普莫雍错的水域面积的突变年份进行叠加分析(见图 5)。由图 5(a) 可知, 1972—2023 年间羊卓雍错水域西南部和东部的湖泊岸线退缩较为显著, 水域面积在 1996 年、2005 年、2013 年发生突变, 1996 年突然扩张, 2004 年之后快速萎缩。1972—2023 年空母错湖泊水域面积总体萎缩, 且西南部和东北部水域岸线退缩显著。巴纠错水域面积在 1997 年、2004 年、2016 年出现突变, 1997 年水域面积开始扩张, 2004 年开始迅速萎缩, 2016 年巴纠错湖泊水域萎缩减缓。巴纠错的北部和东部的水域岸线退缩明显。沉错水域面积在 2002 年之前处于扩

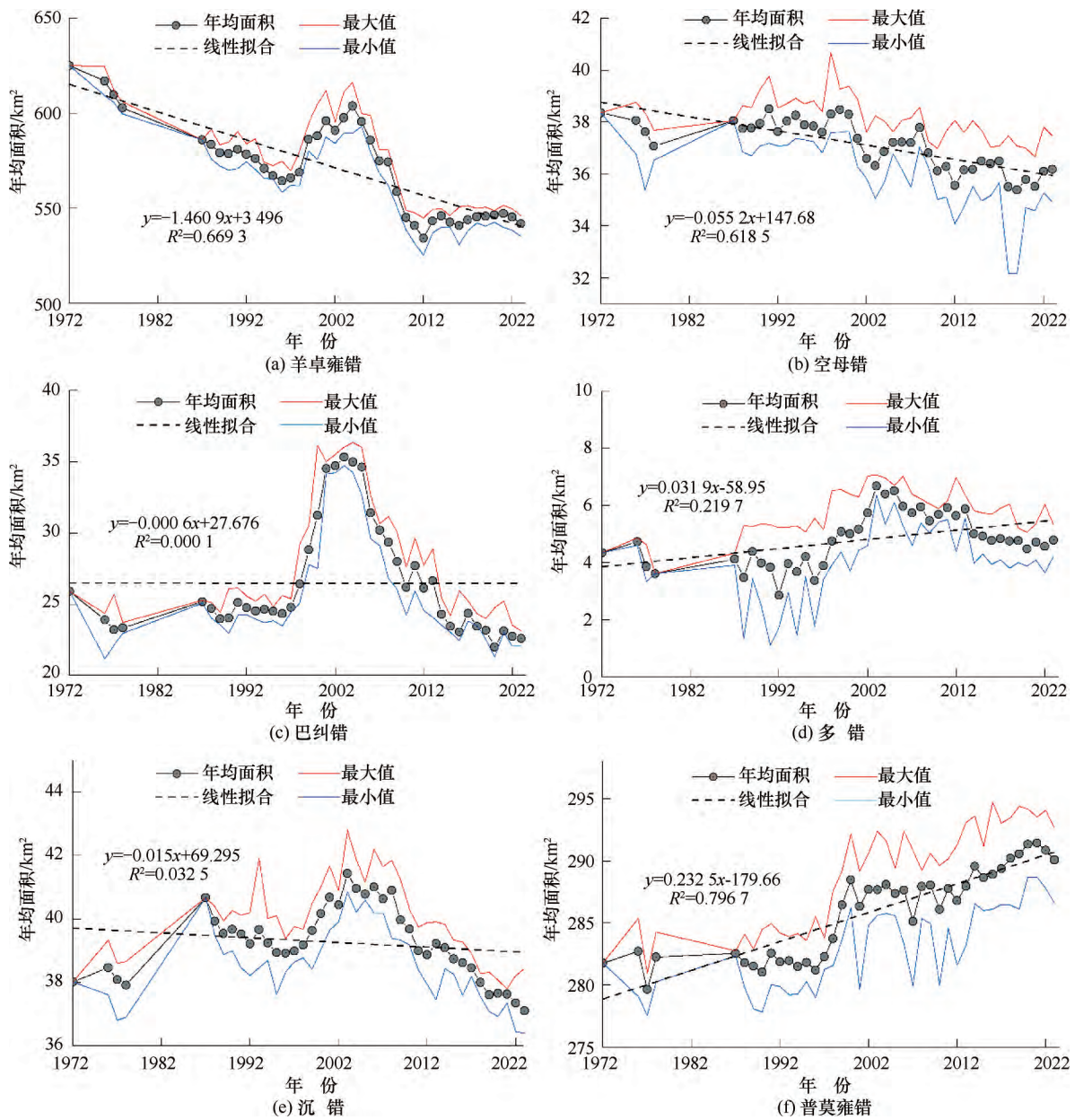


图 4 1972—2023 年湖泊水域面积年均变化

Fig. 4 Variation of average annual lake water area from 1972 to 2023

张, 2002 年后处于萎缩状态, 沉错湖泊水域总体上向湖中心逐步萎缩。多错水域面积在 1996 年、2005 年、2017 年出现突变, 1996 年湖泊水域开始出现扩张, 2005 年湖泊水域面积出现萎缩, 与 1972 年岸线相比, 岸线扩张不明显。由图 5 (b) 可知, 1972—2023 年普莫雍错的西部水域范围有明显的扩张, 1999 年以来快速扩张。

## 2.5 湖泊水域面积的驱动因素分析

### 2.5.1 气象因素的影响

1972—2023 年尼木、贡嘎、拉萨、泽当、江孜、浪卡子站的年均气温、年降水量、相对湿度和年蒸发

量的变化趋势, 如图 6 所示。由图 6 (a) 可知, 1972—2023 年的年均气温变化呈现上升, 平均上升速率为  $0.30\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ; 拉萨站的年均气温上升速率达到  $0.50\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ , 尼木站的年均气温上升速率仅为  $0.10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。同时, 1972—2023 年期间年降水量呈增加趋势, 增长速率仅为  $14.0\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ , 拉萨站的年降水量增长速率较小, 如图 6 (b) 所示。由图 6 (c) 可知, 1972—2023 年羊卓雍错流域的相对湿度呈下降趋势, 平均相对湿度仅下降了  $0.65\%$ 。总体上, 在羊卓雍错流域周边气象台站的年均气温上升的同时, 降水量也呈现增加趋

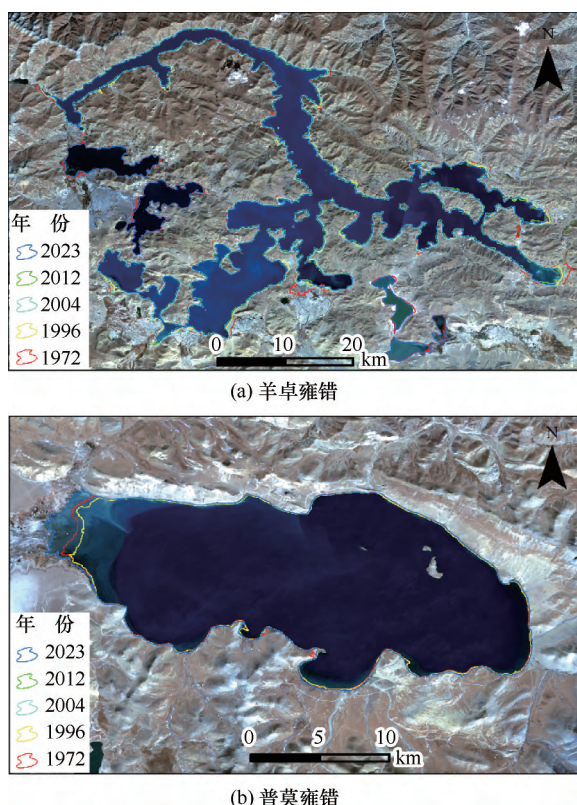


图 5 1972—2023 年羊卓雍错和普莫雍错的岸线位置对比  
Fig. 5 Comparison of the shoreline positions of Yamdrok Yumtso and Pumoyumtso from 1972 to 2023

势, 这说明羊卓雍错流域在 1972—2023 年间的局地气候处于“暖湿化”状态。

地表蒸发量是影响青藏高原地表水分收支和能量平衡的关键气象要素, 对湖泊水域面积和水量变化至关重要。由图 6(d) 可知, 1972—2023 年气象台站的年蒸发量整体呈现减少趋势, 从 2004 年开始, 蒸发量存在迅速下降趋势<sup>[26]</sup>。羊卓雍错的水域面积与年均气温的波动变化趋势不一致, 前者呈波动萎缩趋势, 后者呈显著上升趋势。年均气温在 1997 年之后一直显著上升, 与此同时, 羊卓雍错水域面积在 1996—2004 年期间一直扩张。羊卓雍错的水域面积在 1996—2004 年面积变化与温度存在正相关。2004 年之后, 羊卓雍错的水域面积持续萎缩, 年均气温与湖泊水域面积呈负相关。除了江孜站, 1972—1996 年其余 5 个台站的年降水量略有上升, 1982 年和 1983 年降水偏少。1997—2003 年降水量呈上升趋势; 2004—2023 年降水量呈减少趋势, 但是 2013 年和 2014 年的降水较多。与 2004 年相比, 2023 年降水量仅减少了 9.15 mm。当年降水量增多时, 空母错、巴纠错、多错、沉错、普莫雍

错的水域面积出现扩张; 当年降水量减少时, 湖泊水域面积也会萎缩, 这表明降水对内陆型湖泊水量的补给至关重要。与此同时, 白地水文站数据 2003 年蒸发量为 2000 年以来的极小值, 2004 年以后年蒸发量出现短期上升, 这与羊卓雍错湖泊水域面积持续萎缩较为一致<sup>[27]</sup>。显而易见, 流域蒸发量的变化也是影响湖泊水域面积短期性波动不可忽视的主要因素<sup>[28]</sup>。

### 2.5.2 冰川的影响

羊卓雍错流域受到人类活动的干扰较小, 在全球气候变暖的大背景和高原湖泊生态脆弱化的作用下<sup>[29]</sup>, 作为以降水补给为主的内陆湖泊, 除了气温、蒸发量等气象要素, 地貌覆被和多年冻土退化<sup>[30]</sup>也会间接影响湖泊水域面积波动, 甚至在同一流域内不同湖泊的水域面积变化趋势不一致。高山积雪和冰川融水也是青藏高原内陆湖泊重要的水源补给<sup>[31-32]</sup>, 其中, 多错和巴纠错流域的上游山区无冰川覆盖, 处于相对独立的自然状态条件下, 降水和蒸发直接影响内陆湖泊的水量变化。羊卓雍错、空母错、沉错和普莫雍错的冰川面积占各自集水区面积的比重分别为 0.18%、0.83%、10.29%、9.35%。羊卓雍错、空母错和沉错的冰川面积之和占集水区面积的比重仅为 0.91%; 相对封闭的普莫雍错流域的冰川覆盖面积达到 142.02 km<sup>2</sup>, 在冰川数量、规模、覆盖面积均远高于羊卓雍错、空母错和沉错。羊卓雍错流域冰雪融水补给占总补给量的 9.1%<sup>[33]</sup>, 在 1998—2000 年卡鲁雄曲上游的冰雪融水径流剧增, 引发位于下游的沉错和空母错水域面积扩张<sup>[34]</sup>。在 2009—2021 年卡鲁雄峰和宁金岗桑峰冰川面积共减少了 (10.56±4.22) km<sup>2</sup>, 在同一时期羊卓雍错水域面积呈现萎缩<sup>[35]</sup>, 更进一步表明 2004 年之后湖区水面蒸发量增加是导致羊卓雍错水域面积萎缩的不可忽视的因素。

当气温升高时, 普莫雍错流域内的冰川消融加剧引起地表径流增加, 进而引起湖泊水域面积的扩张, 湖泊水域面积扩张可以通过增强热惯性推迟湖泊封冻, 进而加剧秋季湖泊变暖<sup>[36]</sup>。近 50 年来, 青藏高原冰川区和非冰川覆盖的湖泊的水域面积波动和长期变化趋势会存在一定差异, 冰川消融所引发的湖泊水文效应、气候效应、生态效应值得持续关注 and 深入分析<sup>[37-38]</sup>, 尤其是冰川补给对内陆湖泊变化的驱动机理和生产力的影响仍需进一步研究<sup>[39]</sup>。

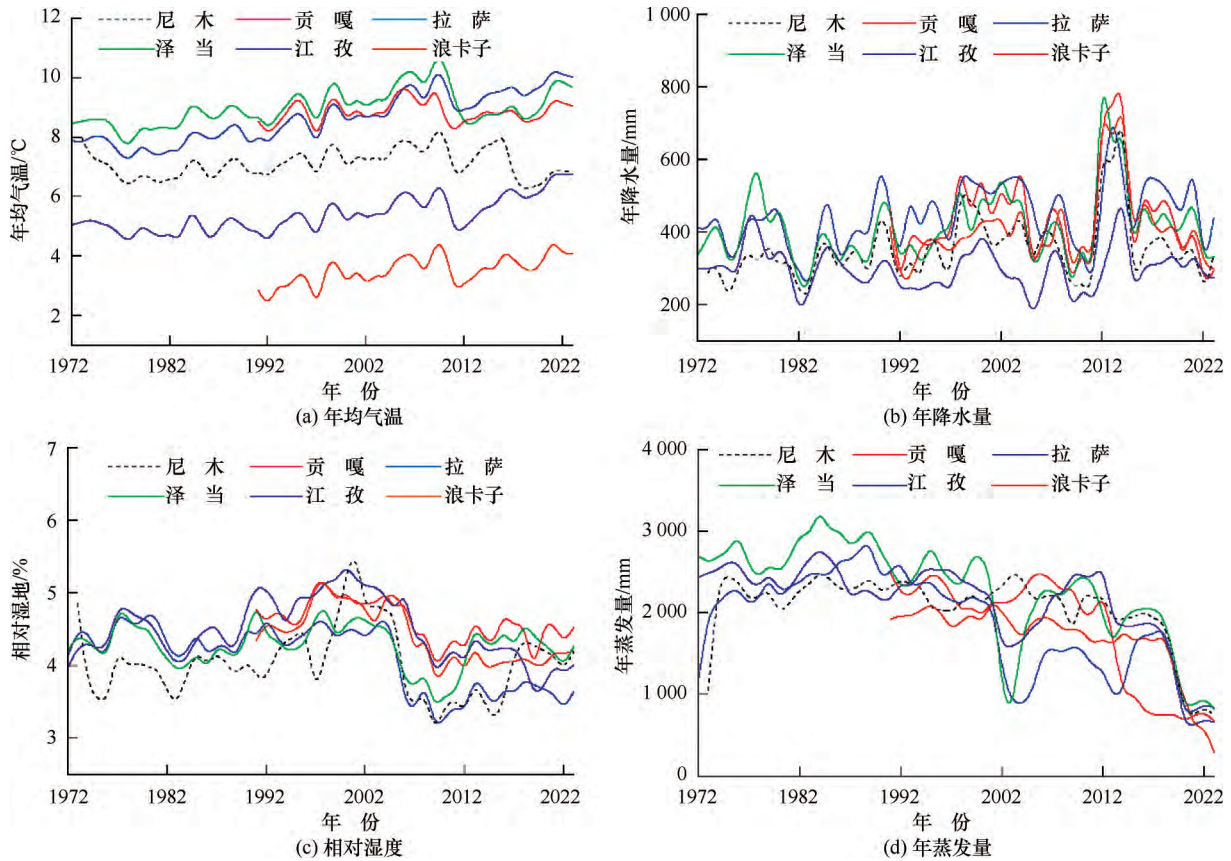


图 6 1972—2023 年气象站的年均气温、年降水量、相对湿度和年蒸发量

Fig. 6 Annual annual temperature, precipitation, relative humidity and evaporation curves of meteorological station from 1972 to 2023

### 3 结论

(1) 1972—2023 年羊卓雍错、空母错、巴纠错、沉错的年均水域面积减小, 其中, 羊卓雍错、空母错、沉错的水力联系紧密, 水域面积变化特征较为相似, 而巴纠错与羊卓雍错没有水力联系; 普莫雍错、多错的年均水域面积呈增加趋势, 与羊卓雍错的水域面积变化趋势不一致, 三者没有水力联系。其中, 羊卓雍错年均水域面积缩减较大, 共减少了 82.72 km<sup>2</sup>。在空间位置上, 普莫雍错的西部水域边界扩张显著, 羊卓雍错的东南部边界后退较为显著。

(2) 羊卓雍错流域内的湖泊受人类活动的影响较小, 且属于高原内陆型湖泊。非冰川补给的多错和巴纠错的水域面积变化主要以自然降水补给为主。除了降水直接影响内陆湖泊水域面积变化, 冰雪融水也是引起冰川补给型内陆湖泊水域面积波动的重要因素。1972—2023 年羊卓雍错湖泊平均气温总体上升, 降水量波动大但增加不明显。2004 年以后, 羊卓雍错的水域面积与年均气温变化趋势不一致, 湖区水面蒸发增加可能是水域短期内迅速萎缩的主因。

羊卓雍错是咸水湖, 不能作为农业和生活用水,

水电站用水较少, 2016 年后停止发电, 对湖泊水量减少、水域萎缩的影响可忽略。考虑水体像元提取过程的误差和目视解译经验不足, 湖泊水域面积可能与实际值会有一定偏差。总体上, Landsat 卫星影像能够持续地提供 8 d 重复周期的湖泊水域面积信息, 中等空间分辨率也适合中大型湖泊的水域信息反演, 湖泊面积的绝对误差可控制在 1.0% 左右。羊卓雍错流域的湖泊水域面积的年变化趋势和空间异质特征, 既能表明内陆湖泊水域变化的气候驱动因素, 也说明冰川补给和非冰川补给的内陆湖泊水域变化的差异, 期望能为流域生态环境保护、水资源评估、水资源管理与利用方面提供理论参考。

#### 参考文献(References):

[1] 王仁军, 刘宝康, 杜玉娥, 等. 基于 GF-6 的可可西里典型湖泊水体面积提取方法研究[J]. 测绘通报, 2022(5): 32-37.  
WANG Renjun, LIU Baokang, DU Yue, et al. Research on water area extraction method of typical lakes in Hoh Xil based on GF-6[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(5): 32-37.

[2] 管玉莹, 虞功亮, 韩睿明, 等. 近 30 年来高邮湖(含邵伯湖)自然水域面积变化及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2019, 32

- (12): 2057-2064.
- GUAN Yuying, YU Gongliang, HAN Ruiming, et al. Change of natural water area and its influencing factors in Gaoyou Lake (including Shaobo Lake) in recent 30 years [J]. *Research in Environmental Sciences*, 2019, 32(12): 2057-2064.
- [3] 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.
- [4] AMINJAFARI S, BROWN I A, FRAPPART F, et al. Distinctive patterns of water level change in Swedish lakes driven by climate and human regulation [J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(3): e2023WR036160.
- [5] 蒋广鑫. 基于深度学习的青藏高原湖泊面积提取及湖泊变化研究[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- JIGANG Guangxin. Research on Lake Area Extraction and Lake Change in the Tibetan Plateau based on Deep Learning[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [6] CHEN Y, WANG Y, LI L, et al. Monthly monitoring of inundated areas and water storage dynamics in China's large reservoirs using multisource remote sensing[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(8): e2023WR036450.
- [7] FU L L, PAVELSKY T, CRETAUX J F, et al. The surface water and ocean topography mission: A breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water [J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(4): e2023GL107652.
- [8] 陈尚书, 孟庆吉. 1998—2021 年艾比湖湖泊面积变化遥感监测及驱动因素分析[J]. *安徽农学通报*, 2023, 29(4): 136-138.
- CHEN Shangshu, MENG Qingji. Remote sensing monitoring and driving factors analysis of lake area change in Ebi Lake from 1998 to 2021 [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2023, 29(4): 136-138.
- [9] 冯思维, 杨清华, 贾伟洁, 等. 基于光学遥感的内陆地表水体提取综述[J]. *自然资源遥感*, 2024, 36(3): 41-56.
- FENG Siwei, YANG Qinghua, JIA Weijie, et al. A review of inland surface water extraction using optical remote sensing [J]. *Remote Sensing of Natural Resources*, 2024, 36(3): 41-56.
- [10] NIROUMAND-JADIDI M, BOVOLO F, BRESCIANI M, et al. Water quality retrieval from Landsat-9 (OLI-2) imagery and comparison to Sentinel-2[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4596.
- [11] 高广旭, 武永斌, 卢小平, 等. 复杂背景下水体提取方法适用性研究[J]. *北京测绘*, 2022, 36(4): 452-456.
- GAO Guangxu, WU Yongbin, LU Xiaoping, et al. Study on the applicability of water body extraction methods in complex backgrounds [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2022, 36(4): 452-456.
- [12] 熊珂, 常云鹏, 关键. 基于归一化差异水体指数的水体面积变化监测[J]. *中南林业调查规划*, 2024, 43(2): 54-57.
- XIONG Ke, CHANG Yunpeng, GUAN Jian. Water area change monitoring based on normalized difference water index: A case study in Hunan Province, China [J]. *South China Forestry Investigation and Planning*, 2024, 43(2): 54-57.
- [13] SHEN M, WANG S, JIANG N, et al. Plant phenology changes and drivers on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 633-651.
- [14] YAO T, THOMPSON L, CHEN D, et al. Reflections and future strategies for Third Pole environment [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 608-610.
- [15] 刘金凤, 田碧青, 吴常雪, 等. 1976—2021 年纳木错和色林错湖泊面积变化及驱动因素分析[J]. *盐湖研究*, 2024, 32(3): 61-68.
- LIU Jinfeng, TIAN Biqing, WU Changxue, et al. Analysis of changes and driving factors in the area of Namtso and Selincuo lakes from 1976 to 2021 [J]. *Salt Lake Research*, 2024, 32(3): 61-68.
- [16] 葛莉. 融合 GLAS 和光学遥感影像的中国主要湖泊动态变化研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- GE Li. Dynamic Changes of Major Lakes in China based on GLAS and Optical Remote Sensing Images [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth), 2017.
- [17] 边多, 杜军, 胡军, 等. 1975—2006 年西藏羊卓雍错流域内湖泊水位变化对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(3): 404-409.
- BIAN Duo, DU Jun, HU Jun, et al. Response of lake water level change to climate change in Yamdrok Lake Basin, Tibet from 1975 to 2006 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 404-409.
- [18] 除多, 普穷, 拉巴卓玛, 等. 近 40a 西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 494-502.
- CHU Duo, PU Qiong, LABA Zhuoma, et al. Remote sensing analysis on the area change of Yamdrok Lake in Tibet during the last 40 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(3): 494-502.
- [19] 张嘉琪, 张会兰, 刘雪妍. 1985—2021 年青藏高原典型湖泊水文特征及关键影响因素[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 140-149.
- ZHANG Jiaqi, ZHANG Huilan, LIU Xueyan. Hydrological characteristics and key influencing factors of typical lakes on the Qinghai Tibet Plateau from 1985 to 2021 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 140-149.
- [20] 郝洁, 李靖瑄, 连子旭, 等. 青藏高原湖泊面积变化规律及影响要素分析[J]. *水文*, 2024, 44(1): 112-118.
- HAO Jie, LI Jingxuan, LIAN Zixu, et al. Analysis of lake area change and its influencing factors in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of China Hydrology*, 2024, 44(1): 112-118.
- [21] 白玛央宗, 普布次仁, 戴睿, 等. 1972—2018 年西藏玛旁雍错和拉昂错湖泊面积变化趋势分析[J]. *高原科学研究*, 2020, 4(2): 19-26.
- BAIMA Yangzong, PUBU Ciren, DAI Rui, et al. Analysis on the change trend of lake area in Manasarovar and Laangtso in Tibet from 1972 to 2018 [J]. *Plateau Scientific Research*, 2019, 4(2): 19-26.
- [22] 赵永利. 西藏羊卓雍错流域冰川-湖泊动态变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(8): 88-93.
- ZHAO Yongli. Study on dynamic changes of glacier-lake in Yamdrok Valley, Tibet [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(8): 88-93.

- [23] ZHANG Q, SHEN Z, POKHREL Y, et al. Oceanic climate changes threaten the sustainability of Asia's water tower [J]. *Nature*, 2023, 615( 7950): 87-93.
- [24] 曾林, 牛晓俊, 边多, 等. 西藏高原典型湖泊面积变化遥感分析 [J]. *高原科学研究*, 2022, 6( 3): 1-8.  
ZENG Lin, NIU Xiaojun, BIAN Duo, et al. Remote sensing analysis of area changes of typical lakes on the Xizang Plateau [J]. *Plateau Science Research*, 2022, 6( 3): 1-8.
- [25] MCFEETERS S K. Using the normalized difference water index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5( 7): 3544-3561.
- [26] QIU Y, CHEN J, CHEN D, et al. Lake-area expansion alters downwind precipitation patterns on the Tibetan Plateau: Insights from the most dramatically expanded lake [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128( 15): e2023JD039274.
- [27] 唐汉铎, 次旦央宗, 曾辰, 等. 1974—2019年西藏羊卓雍错湖泊水位变化特征及其影响因素 [J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35( 4): 83-89.  
TANG Handuo, CIDAN Yangzong, ZENG Chen, et al. Variation characteristics and influencing factors of water level in Yamdrok Lake, Tibet from 1974 to 2019 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35( 4): 83-89.
- [28] JI H, PENG D, GU Y, et al. Snowmelt runoff in the Yarlung Zangbo River Basin and runoff change in the future [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15( 1): 55.
- [29] JIANG J, ZHOU T J, QIAN Y, et al. Precipitation regime changes in High Mountain Asia driven by cleaner air [J]. *Nature*, 2023, 623( 7987): 544-552.
- [30] XIA Z, LIU L, MU C, et al. Widespread and rapid activities of retrogressive thaw slumps on the Qinghai-Tibet Plateau from 2016 to 2022 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51( 17): e2024GL109616.
- [31] ROYCHOUDHURY C, HE C, KUMAR R, et al. On the relevance of aerosols to snow cover variability over high mountain Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49( 18): e2022GL099317.
- [32] CHEN W, YAO T, ZHANG G, et al. Accelerated glacier mass loss in the largest river and lake source regions of the Tibetan Plateau and its links with local water balance over 1976—2017 [J]. *Journal of Glaciology*, 2021, 67( 264): 577-591.
- [33] 扎西欧珠, 边巴次仁, 米玛卓玛, 等. 1987—2021年羊卓雍错西岸冰川变化及其对气候变化的响应 [J]. *高原科学研究*, 2023, 7( 4): 32-39.  
ZHAXI Ouzhu, BIANBA Ciren, MIMA Zhuoma, et al. Glacier change and its response to climate change on the west coast of Yamdrok Lake from 1987 to 2021 [J]. *Plateau Scientific Research*, 2019, 7( 4): 32-39.
- [34] 张菲, 刘景时, 巩同梁, 等. 喜马拉雅山北坡卡鲁雄曲径流与气候变化 [J]. *地理学报*, 2006, 61( 11): 1141-1148.  
ZHANG Fei, LIU Jingshi, GONG Tongliang, et al. The Karuxiong meandering path on the northern slope of the Himalayas and climate change [J]. *Journal of Geography*, 2006, 61( 11): 1141-1148.
- [35] WU Y, ZHU L. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co Catchment, central Tibetan Plateau, during 1970—2000 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18( 2): 177-189.
- [36] QIU Y L, CHEN J, CHEN D L. Changes in lake surface temperature on the Tibetan Plateau from 2000 to 2022 and their driving factors [J]. *Science China Earth Sciences*, 2025, 68. DOI: 10.1007/s11430-024-1527-4.
- [37] DAI Y, WANG T, SHENG Y, et al. Westerly-triggered lake-effect snowfall enhanced with climate warming over the Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*, 2024, 69( 7): 968-977.
- [38] JOUBERTON A, SHAW T E, MILES E, et al. Warming-induced monsoon precipitation phase change intensifies glacier mass loss in the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119( 37): e2109796119.
- [39] 张玉枝, 马雪洋, 李倩, 等. 全球变暖对青藏高原不同补给类型湖泊生产力的影响 [J]. *地理科学*, 2024, 44( 2): 351-358.  
ZHANG Yuzhi, MA Xueyang, LI Qian, et al. Impact of global warming on lake productivity in different lakes on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44( 2): 351-358.

(责任编辑 王海锋)