



2000 – 2020年赛里木湖动态变化及成因分析

李旭冰 刘爱利 李诺 侯映旭 胡翠琴 黄晓东

Dynamic changes and factors of Sailimu Lake from 2000 to 2020

LI Xubing, LIU Aili, LI Nuo, HOU Yingxu, HU Cuiqin, HUANG Xiaodong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0092>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2000–2014年博斯腾湖流域NPP时空变化特征及影响因子分析

Spatio-temporal variations and impacting factors of vegetation NPP in the Bosten Lake Drainage Basin from 2000 to 2014

草业科学. 2018, 12(7): 1743 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0622>

基于结构方程模型的草原旅游目的地竞争力分析：以赛里木湖和那拉提草原为例

Competitiveness analysis of grassland tourist destinations based on a structural equation model taking Sayram Lake and Narati Grassland as examples

草业科学. 2020, 37(9): 1749 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0260>

张家口市供水结构时空演变及驱动力分析

Spatio-temporal evolution analysis and underlying driving forces of water supply and consumption structures in Zhangjiakou, China

草业科学. 2020, 37(7): 1354 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0283>

毛乌素沙地1990–2014年景观格局变化及驱动力

Dynamics and driving forces of landscape patterns in Mu Us Sandy Land, from 1990 to 2014

草业科学. 2017, 11(2): 255 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0258>

艾丁湖盐角草种群动态生命表及其对温度变化的响应

Dynamic life table and response to temperature change of *Salicornia europaea* in Ayding Lake

草业科学. 2017, 11(5): 1064 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0424>

祁连山国家公园植被净初级生产力时空演变及驱动因素分析

Spatio-temporal evolution of vegetation net primary productivity in Qilian Mountain National Park and its driving factors

草业科学. 2020, 37(8): 1458 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0613>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0092

李旭冰, 刘爱利, 李诺, 侯映旭, 胡翠琴, 黄晓东. 2000—2020 年赛里木湖动态变化及成因分析. 草业科学, 2022, 39(10): 1-11.

LI X B, LIU A L, LI N, HOU Y X, HU C Q, HUANG X D. Dynamic changes and factors of Sailimu Lake from 2000 to 2020. Pratacultural Science, 2022, 39(10): 1-11.

2000—2020 年赛里木湖动态变化及成因分析

李旭冰¹, 刘爱利¹, 李 诺¹, 侯映旭¹, 胡翠琴¹, 黄晓东²

(1. 南京信息工程大学地理科学学院, 江苏 南京 210044;

2. 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室 / 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 720000)

摘要: 湖泊是气候变化的指示器, 也是气候变化研究的热点之一。本文利用 2000—2020 年的多时相 Landsat 资料, 以及星载激光测高卫星——冰、云和陆地高程卫星 (ice, cloud, and land elevation satellite, ICESat/ICESat2), 分析了新疆北疆地区赛里木湖面积、水位及体积的动态变化, 并分析其变化的主要驱动因子。结果表明, 20 年间赛里木湖的面积、水位及体积均呈现持续增加的趋势, 其中湖泊面积增加约 3.43 km², 水位累积上升 1.28 m, 湖泊在空间上主要朝地势平坦的西部扩张。赛里木湖流域气候向暖湿化转变, 气温升高, 降水增加且达到显著水平。在暖湿化背景下, 赛里木湖流域的生态环境得到极大的改善, 促进了湖泊周边植被水源涵养能力的提高。分析结果表明气候暖湿化以及湖泊周边生态环境的改善是导致湖泊扩张的重要因素, 其中降水增加是主要因素。

关键词: 赛里木湖; Landsat; ICESat; 时空动态; 气候变化; 地理探测器; 驱动力

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)10-0001-11

Dynamic changes and factors of Sailimu Lake from 2000 to 2020

LI Xubing¹, LIU Aili¹, LI Nuo¹, HOU Yingxu¹, HU Cuiqin¹, HUANG Xiaodong²

(1. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

2. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems / College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: As indicators of climate change, lakes are an imperative subject of research on climate change. This study analyzed the spatiotemporal variations in water levels, areal extent, volume, and the main driving factors of Sailimu Lake in northern Xinjiang based on data derived from Landsat and satellite-borne Laser Altimeter Satellite-ice, cloud, and land elevation satellite (ICESat/ICESat2) from 2000 to 2020. The study results show that during the past 20 years, the areal extent, water levels, and volume of the Sailimu Lake have increased continuously. The lake area extent and water level increased by 3.43 km² and 1.28 m, respectively. Spatially, it mainly expanded toward the central flat area in the west. A wetter and warmer climate change trend was observed over 20 years in the Salimu Lake Basin, which resulted in a significant increase in temperature and precipitation. The ecological environment of the Sailimu Lake Basin has greatly improved under the warmer and wetter climate, leading to an improvement in water conservation capacity. The analysis results show that the warming and humidification of the climate and the improvement of the ecological environment around the lake are important factors leading to the expansion of the lake, among which increased precipitation is the main factor.

Keywords: Sailimu Lake; Landsat; ICESat; spatio-temporal dynamics; climate change; Geodetector; driving factor

Corresponding author: HUANG Xiaodong E-mail: huangxd@lzu.edu.cn

收稿日期: 2022-02-16 接受日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41971293)

第一作者: 李旭冰 (1997-), 女, 江苏无锡人, 在读硕士生, 研究方向为冰冻圈遥感。E-mail: lx13921189095@163.com

通信作者: 黄晓东 (1980-), 男, 河南新蔡人, 教授, 博士, 研究方向为冰冻圈遥感与全球变化。E-mail: huangxd@lzu.edu.cn

湖泊对气候变化极为敏感,其面积和水位的变化是对流域气候,包括降水、蒸发、气温等因素的综合反映^[1-2]。随着全球变暖,湖泊尤其是高寒地区的湖泊已经发生了显著的变化,对周边的生态环境产生了巨大的影响^[3]。因此,准确监测湖泊水位及面积的动态变化,不仅对深入了解湖泊对气候变化的响应机制,而且对流域水资源管理、生态环境保护以及应对气候变化均具有重要的研究意义^[2]。

卫星遥感技术的发展为准确监测湖泊面积的动态变化提供了便利。目前国内外不少学者利用不同遥感数据源,对不同地区的湖泊面积动态变化进行了监测^[1,3-10]。随着 ICESat/ICESat2 (ice cloud and land elevation satellite) 激光测高卫星的发射成功^[11],使大范围湖泊水位动态变化的监测成为了可能。ICESat 是由美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 于 2003 年发射的地球上第一个极地轨道卫星激光高度计,它在约 600 km 的高度运行,并由 3 个激光传感器采集 86° N~86° S 和极地大部分区域数据,轨道间隔为 150 m,以 50 Hz 的工作频率可在地球表面产生连续的约 70 m 的高程足迹^[12]。ICESat-2 于 2018 年启动,不同于 ICESat 使用的全波形仿真系统,ICESat-2 配备的是先进地形激光测高仪系统 (advanced terrain laser altimeter system, ATLAS),该系统使用的是多光束微脉冲激光 (也称光子计数),以极高的重复频率 (10 kHz) 运作,既能使得沿轨道的分辨率大大提高,也能使数据覆盖范围扩大和数据集精度提高^[13]。该数据获取的测高数据以厘米级的精度在湖泊水位变化监测方面已经得到了广泛的应用^[12]。

在全球变暖的背景下,累积降水和极端降水事件的增加是导致高寒湖泊变化的主要原因,冰川退缩和冻土退化的加速则是导致高寒湖泊变化的次要原因^[14-17]。张国庆^[18]研究了过去 40 多年来青藏高原湖泊年际变化趋势和年代际动态变化过程,从定性角度上认识到了驱动湖泊动态变化的因素与气候的持续变暖有莫大的联系。马明国等^[19]利用早期的 Landsat TM 资料以及 2000 年以来的中巴资源卫星资料分析了 1970—2006 年间新疆若羌湖群面积的动态变化趋势,研究发现自 2002 年以来,该地区的湖泊面积有较为显著的增加趋势,原因可能是冰川消融增加、降水增加以及生态输水。

赛里木湖地处天山西段北麓,属于高山内陆湖泊,具有重要的生态服务和水源涵养功能^[22]。自 20 世纪 80 年代以来,受西北暖湿气候的影响,赛里木湖流域降水增加,径流增多,导致赛里木湖水位持续上升,面积不断扩张^[20-23]。已有研究表明赛里木湖近 30 年来一直处于扩张的态势,但缺乏对湖泊时空变化特征及驱动力的分析。本文基于多源遥感数据和气象数据,分析赛里木湖 2000—2020 年湖泊面积、水位及体积的动态变化趋势,并尝试分析造成湖泊发生变化的气候及环境因素,以期揭示赛里木湖对气候变化的响应机理奠定基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

赛里木湖位于新疆博尔塔拉州境内的西天山北麓,湖面海拔约 2 073 m,东西长约 30 km,南北宽约 27 km,蓄水量达 $2.1 \times 10^{10} \text{ m}^3$,是新疆面积最大的高山湖泊,被誉为“大西洋的最后一滴眼泪”^[23]。赛里木湖地处欧亚大陆腹地,属典型的内陆高山湖泊湿地生态系统,是我国西部干旱地区中的重要湿地,以赛里木湖为中心,环湖分布有 26 条河流、泉流以及多条季节性河沟等,除查干郭勒、及仁乌苏河等河流入湖水量较大外,其他河流及泉流均靠降水和季节积雪消融补给,出山后以地下径流形式补给^[21]。受暖湿气候的影响,赛里木湖流域降水径流增多,湖泊水位自 1985 年以来不断上升^[22-23]。

1.2 研究数据

Landsat 数据来自美国地质调查局地球观测数据中心发布的标准正射产品 (<http://glovis.usgs.gov>),用来提取水体边界信息,时间跨度为 2000—2020 年,空间分辨率为 30 m。赛里木湖在 1 月—4 月大多被积雪和湖冰覆盖,无法准确识别其边界,因此下载 2000—2020 年期间 5 月—12 月包括 Landsat 7 ETM+ (Enhance Thematic Mapper Plus) 和 Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) 共约 72 景云量小于 5% 的 Landsat 影像。其中利用 ENVI 软件中的条带修复插件对 Landsat7 ETM+ 影像进行了填充修复。

ICESat 数据用来提取湖面的水位信息。采用时间跨度为 2003—2007 年的 ICESat/GLA14 和 2018—2020 年的 ICESat-2/ ATL08 卫星陆地测高数据集。ICESat

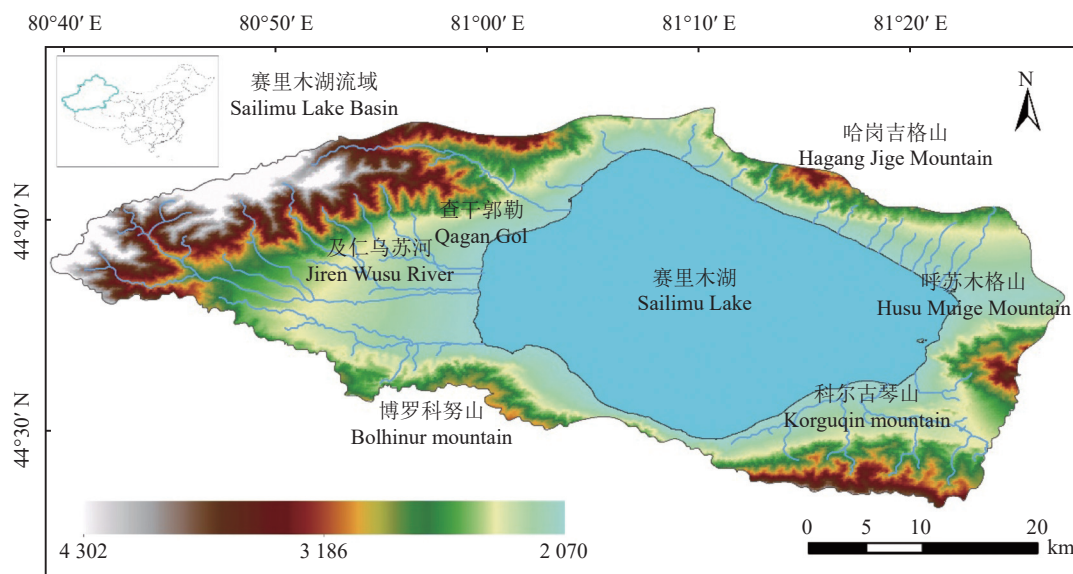


图 1 赛里木湖流域

Figure 1 Sailimu Lake Basin

和 ICESat-2 卫星的重复周期均为 91 d, 其中 ICESat 足迹间距约 172 m, 每个足迹点的直径约 70 m^[24]; ICESat2 激光器包括 6 条波束, 可以实现 6 个条带的连续测量, 且足迹间距仅为 0.7 m, 足迹直径 14 m^[25]。

逐月气候要素数据 (气温、降水、蒸发量) 来源于国家地球系统科学数据中心地理资源分中心 (<http://gre.geodata.cn>)。该数据集为根据 IPCC 耦合模式比较计划第六阶段 (CMIP6) 以及 WorldClim 发布且经过 Delta 降尺度而生成的全球气候模式数据, 空间分辨率为 1 km。该数据集利用 496 个独立气象观测站点数据进行了验证, 验证结果表明该数据集的精度较为可靠^[26]。其他辅助数据还包括 2000—2019 年逐日无云积雪面积数据集, 来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn/>), 用于提取赛里木湖流域的积雪面积比例和积雪日数; 植被数据来源于美国国家航空航天局 (网址为 <https://earthdata.nasa.gov/>) 搭载在 Aqua 传感器上的 MYD13A1 植被指数 16 d 合成产品, 空间分辨率为 500 m, 时间跨度为 2002—2020 年。上述数据主要用于分析赛里木湖变化的成因。

1.3 研究方法

1.3.1 湖泊边界、水位及体积

采用归一化水体指数 (normalized difference of water index, NDWI) 的方法提取水体范围^[27], 并对部分有云遮挡或边界错误的部分湖泊矢量图层进行

手工编辑和质量检验, 以准确提取出湖泊水体矢量边界。其中 NDWI 的计算公式如下:

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

式中: R_{Green} 代表绿光波段的反射率, R_{NIR} 代表近红外波段的反射率。

使用 HDFView 读取 2003—2007 年 ICESat/GLA14 卫星激光测高数据和 2018—2020 年 ICESat-2/ATL13 卫星激光测高数据, 然后对赛里木湖湖面上所有轨迹点的逐年高程数据进行提取, 导出成 csv 文件后剔除异常值^[28], 对逐年湖泊水位高程数据取平均, 得到不同时期湖面的水位信息。

$$\bar{H} = \sum_{i=1}^N H_i / N \quad (2)$$

式中: $\bar{H}$ 为平均湖泊水位, 即湖面上所有有效轨迹点的平均高程; H_i 为有效轨迹点的高程, N 为湖面上有效轨迹点的数量。

利用提取后的边界和水位数据, 拟合湖面面积和水位的线性回归模型, 对 ICESat 数据空缺期 (2008—2017 年) 的湖面水位进行填充, 得到 2000—2020 年完整时间序列的湖泊水位数据, 拟合公式如下所示:

$$H = 0.4265 \times S + 1878 \times R^2 = 0.9377 \quad (3)$$

式中: H 为拟合湖泊水位, S 为湖泊面积。

对面积不规则的湖泊, 其体积近似按圆台的体积计算^[29], 如公式 (4) 所示:

$$V = \frac{1}{3}h \times (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \times S_2}). \quad (4)$$

式中: S_1 、 S_2 为圆台上下底面积, h 为圆台高度, 湖泊体积变化由两个圆台体积之差求得^[29], 即公式 (5):

$$\Delta V = \frac{1}{3}(H_2 - H_1) \times (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \times A_2}). \quad (5)$$

式中: ΔV 为湖泊体积从湖面高程 H_1 和面积 A_1 变化到高程 H_2 和面积 A_2 的变化量。

1.3.2 动态度

湖泊面积动态度可以反映不同时期湖泊面积变化的剧烈程度, 本研究采用湖泊面积动态度分析湖泊的变化特征^[30]。其计算表达式为:

$$K = \frac{S_b - S_a}{S_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%。 \quad (6)$$

式中: K 为研究时段内湖泊面积动态度; S_a 和 S_b 分别为研究初期和末期的湖泊面积; T 为研究时段长, 单位为年, 本文设置 $T = 5$, 用于监测湖泊的变化剧烈程度。

1.3.3 驱动因子探测

为了探究导致湖泊变化的驱动因子, 本文借助地理探测器进行湖泊变化驱动因子分析。地理探测器是探测空间分异性, 以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法^[31-32]。其核心思想是如果某个自变量对某个因变量有重要影响, 那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性。即假设赛里木湖湖泊水面面积受降水、气温、积雪等某一影响因素的作用而变化, 则湖泊变化与其影响因素的空间分布类似。地理探测器采用 q 值衡量影响因素对湖泊面积变化

的解释力, 值越大, 解释力就越强。 q 值计算公式为:

$$q = 1 - \frac{S_{SW}}{S_{ST}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2}。 \quad (7)$$

式中: S_{SW} 和 S_{ST} 分别为层内方差之和及区域总方差; i 为自变量 X 或因变量 Y 的分层; N_i 和 N 分别为层 i 和全区的单元数; σ_i^2 和 σ^2 分别为层 i 和全区 Y 值的方差。

2 结果与分析

2.1 赛里木湖动态变化特征

2000—2020 年期间, 赛里木湖湖泊面积和水位均呈增加趋势, 在研究时段内面积由 460.05 km^2 扩张到 463.48 km^2 , 20 年间扩大了约 3.43 km^2 , 平均扩张速率为 $1.715 \text{ km}^2 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 20 年间水位累计上升了 1.28 m (图 2a)。其中 2000—2005 年期间面积和水位增加剧烈, 之后趋于平稳。2008 年有回落, 但幅度较小。赛里木湖湖水体积也呈现增加趋势, 但增幅呈现波动缩小的趋势, 增幅递减率为 $0.03 \text{ km}^3 \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 其中 2006 年体积变化率达到最小, 为 -0.02 km^3 (图 2b)。赛里木湖面积动态度呈现由大到小, 再由小到大的“U”型变化特征, 湖泊动态度在 2000—2014 年呈逐渐减小的趋势, 随后动态度开始增加, 说明在 2014 年之前, 湖泊变化剧烈程度逐年降低, 但之后又呈逐年增加的趋势 (图 3)。

以 2000 年湖泊边界位置为初始值, 测量湖泊扩张后 8 个方向 (北、东北、东、东南、南、西南、

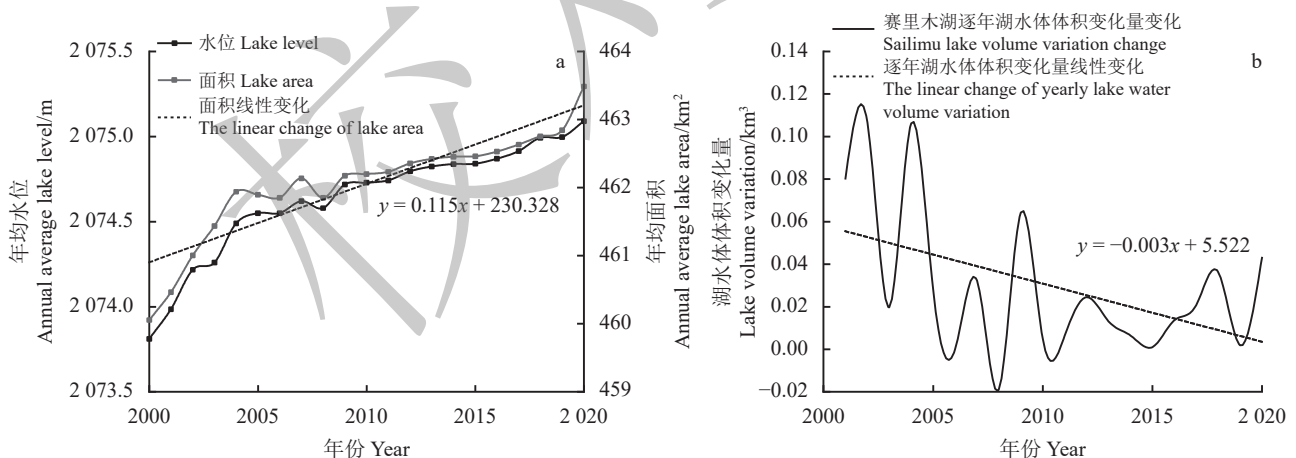


图 2 2000—2020 年赛里木湖年际动态变化

Figure 2 Interannual dynamic changes of Sailimu Lake from 2000 to 2020

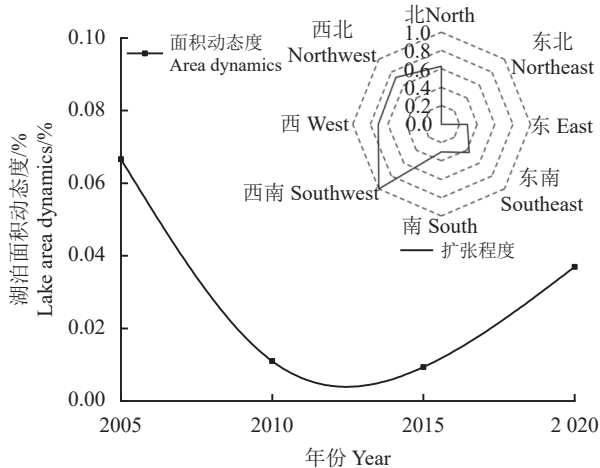


图 3 2000—2020 年赛里木湖水水面边界空间变化和湖泊动态度变化

Figure 3 Spatial changes of the water surface boundary and changes of lake dynamics in Sailimu Lake from 2000 to 2020

西、西北) 的扩张距离, 将扩张距离取平, 然后计算不同方向的距离归一化值, 用于表示赛里木湖在不同方向的扩张程度。结果表明, 2000—2020 年期间, 赛里木湖主要向西扩张, 其中西南方向扩张程度最大(图 3)。湖泊向东部扩张程度较小, 仅向东和东南方向有一定程度的扩张。湖泊边界的扩张程度与赛里木湖流域的地形密切相关。赛里木湖西部有西海草原, 入湖溪流数量较多, 湖区地势相对平缓。近年来随着湖水上涨, 草地受到湖水侵蚀而坍塌, 部分区域已经淹没在湖水中, 从而转变为有水草生长的湿地。东部相较于西部, 距离哈岗吉格山、科尔古琴山和呼苏木格山体较近, 湖岸相对陡峭且落差较大, 湖面与湖岸陆地有 2~3 m 的高差^[3]。地形限制表明湖泊西侧是赛里木湖未来扩张的主要方向。

2.2 赛里木湖流域环境因子变化特征

2000—2020 年赛里木湖流域不同环境因子的变化趋势分析表明, 流域内年均降水量呈显著增加的趋势 ($P < 0.05$) (图 4a), 但是存在年际波动; 3 年滑动平均结果表明, 年降水量大约以 7 年为一个周期, 在一个周期内表现为先增后减, 整体上年降水量呈现波动上升的趋势, 且趋势显著, 线性拟合递增率为 $87.56 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 说明赛里木湖流域近 20 年来降水量持续增加。年蒸发量和气温在 20 年间均表现为增加趋势, 但趋势不显著, 3 年滑动平均结果与年降水量趋势相同, 均呈波动上升的趋势

(图 4b、c)。研究区 NDVI 增加趋势极显著 ($P < 0.01$) (图 4d), 说明赛里木湖流域近年来随着气温升高、降水增加, 生态环境得到极大的改善, 植被类型以草地为主的流域总体上均在变好。积雪作为降水的一种形式, 春季积雪融水对地表径流贡献较大, 从而影响赛里木湖的面积和水位^[18], 不同年份积雪覆盖日数分析结果表明, 流域内年均积雪覆盖日数和积雪覆盖率均呈增加的趋势, 且都达到显著水平 ($P < 0.05$) (图 4e、f), 说明在年降水增加的背景下, 研究区积雪也在增加。

研究区不同环境因子时空格局及变化特征分析结果进一步证明了赛里木湖流域不同环境因子都呈增加趋势(图 5)。研究区年均降水量为 393~721 mm, 且自西向东降水逐渐增加, 表现为周边山区的降水量显著大于湖泊盆地的空间格局, 流域内所有区域降水均呈增加趋势, 但与流域内年均降水趋势增加显著的结果不一致(图 5a)。年均蒸发量和气温的空间格局与降水完全相反, 山区蒸发量小于湖盆, 年均蒸发量介于 282~734 mm, 年均温介于 $-9 \sim 2.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 5b、c)。其中蒸发量流域内除北部区域呈现增加趋势以外, 大部分区域均呈显著增加趋势。年均气温变化整体也表现为增加, 但增加并不显著。NDVI 的高值主要集中分布在赛里木湖西侧, 整体变化趋势均表现为增加, 但仅部分区域表现为显著增加(图 5d)。因为积雪覆盖率无法统计空间变化, 因此仅展示了流域积雪覆盖日数的空间变化(图 5e)。分析结果表明, 积雪日数整体呈增加趋势, 湖泊西侧部分区域的积雪日数增加达到显著水平。

2.3 赛里木湖对环境因子变化的响应

为了进一步解释赛里木湖变化对流域环境因子的响应, 本研究分析了湖泊面积与不同环境因子在月际尺度的变化关系(图 6)。由于赛里木湖每年 1 月—4 月属于封冻期, 从 4 月份开始慢慢融冰, 所以在研究赛里木湖湖泊面积的月际变化与各气象要素的关系时, 只能选用每年 5 月—12 月的湖泊面积及各气象要素。赛里木湖的面积存在月际变化特征, 自 5 月份面积开始扩大, 6 月份达到最大值, 然后开始减小, 7 月份之后面积开始平缓上升, 11 月份之后又减少。降水量的月际变化趋势可以很好地解释赛里木湖面积的变化, 当月降水较大时, 湖泊

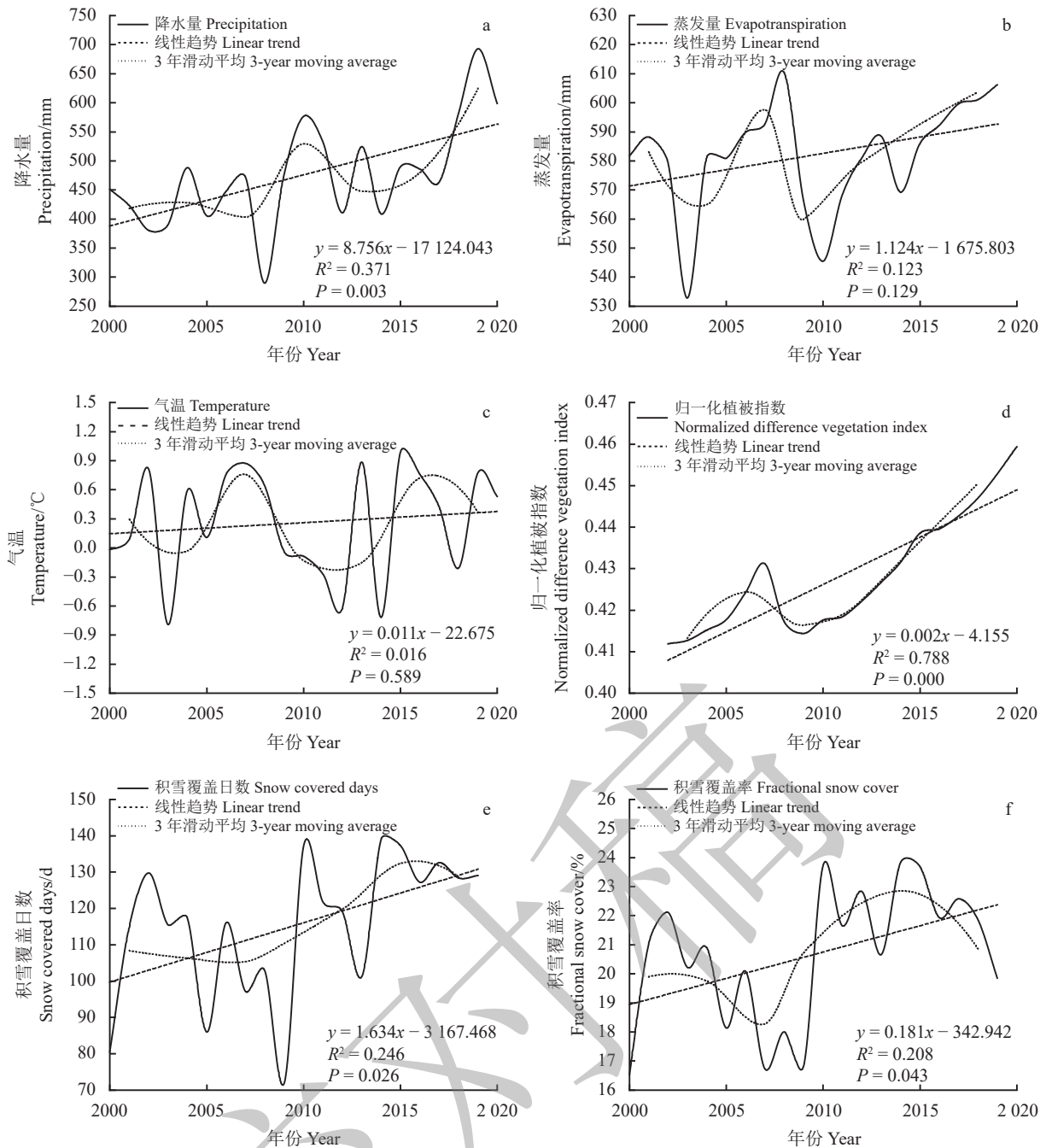


图 4 2000—2020 年赛里木湖流域环境因子变化趋势

Figure 4 Trends of environmental factors in the watershed of Sailimu Lake from 2000 to 2020

面积也会表现为显著的增加。降水量小的月份,湖泊面积增加量也趋于平缓(图 6a)。蒸发量和温度变化极为相关,温度较高时蒸发强,从而会导致湖泊水位下降。研究区 7 月份温度最高,蒸发也最强,这是湖泊面积在 7 月相比 6 月面积剧烈减小的主要原因,随着温度的降低和蒸发量的减少,湖泊水位变化逐渐平缓(图 6b、c)。植被越丰富,涵养水源的能力越强,因此在流域生态环境改善的前提下,对湖

泊面积的增加在理论上应该呈正向效应^[33-34], NDVI 月季变化不足以说明植被与湖泊面积变化的关系,但图 6d 依然显示出与降水和气温同步的变化,可以间接解释湖泊面积的变化。研究区积雪的变化在融雪期与湖泊面积增加具有很好的同步性(图 6e、f), 5 月—6 月积雪消融剧烈,与同期湖泊面积增加趋势一致, 11 月份积雪开始累积,此时流域内降水形式为降雪,对湖泊面积变化无贡献,由于湖面持续

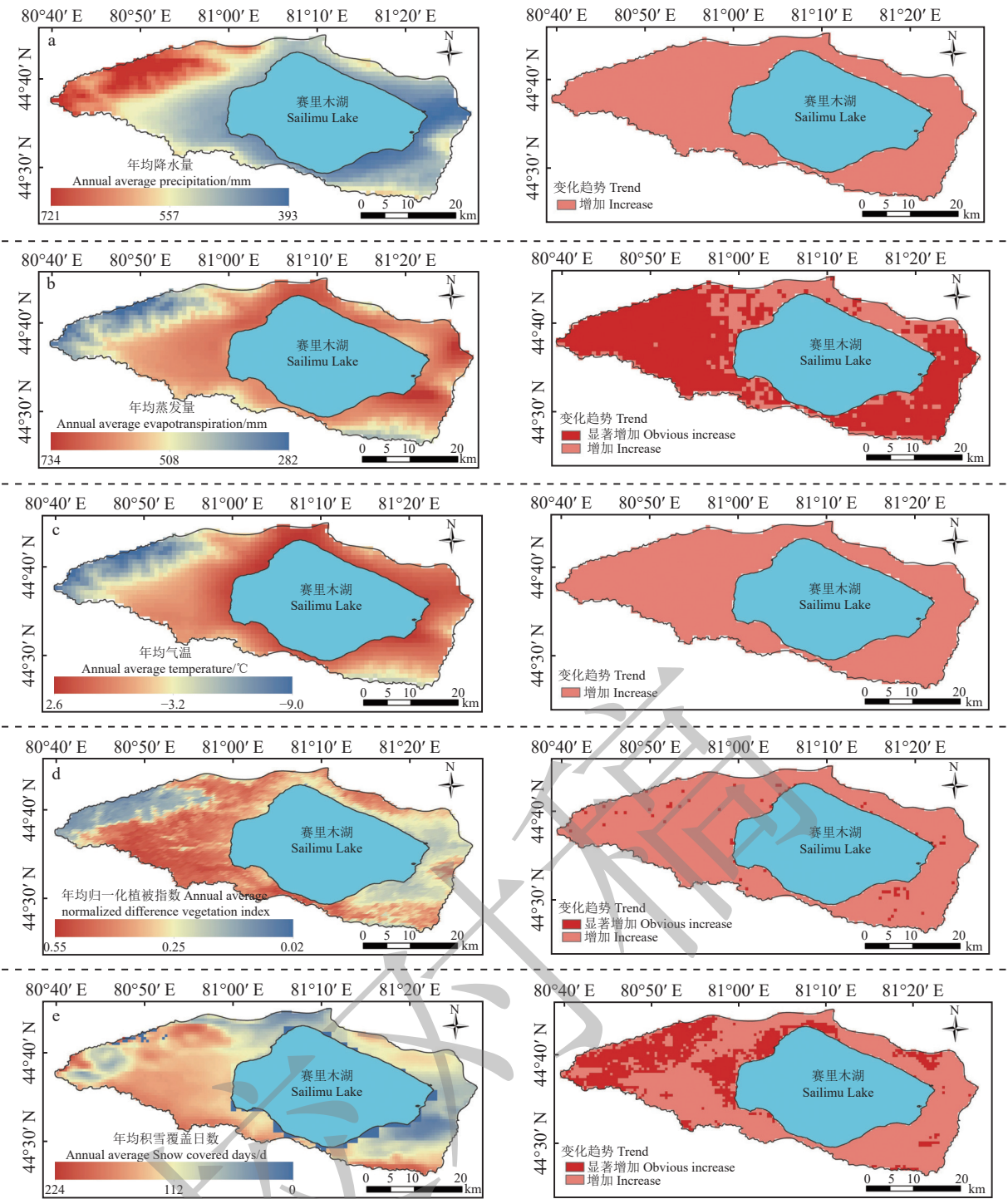


图 5 2000—2020 年赛里木湖流域环境因子时空格局及变化特征

Figure 5 Spatial-temporal pattern and change characteristics of environmental factors in the Sailimu Lake Basin from 2000 to 2020

蒸发, 湖泊面积开始减小。

2.4 驱动力分析

基于地理探测器方法分析了环境因子对湖泊面积扩大的贡献度。采用 2000—2020 年间 72 个时相获

取的湖泊面积数据与对应的环境因子, 分析了影响赛里木湖湖泊面积变化的各因子探测结果(表 1)。结果表明, 本研究选取的因子对赛里木湖面积扩张均具有一定的贡献, 解释力 q 值均超过 0.75, 各因子的解释力排序为降水量 > 归一化植被指数 > 蒸发量 >

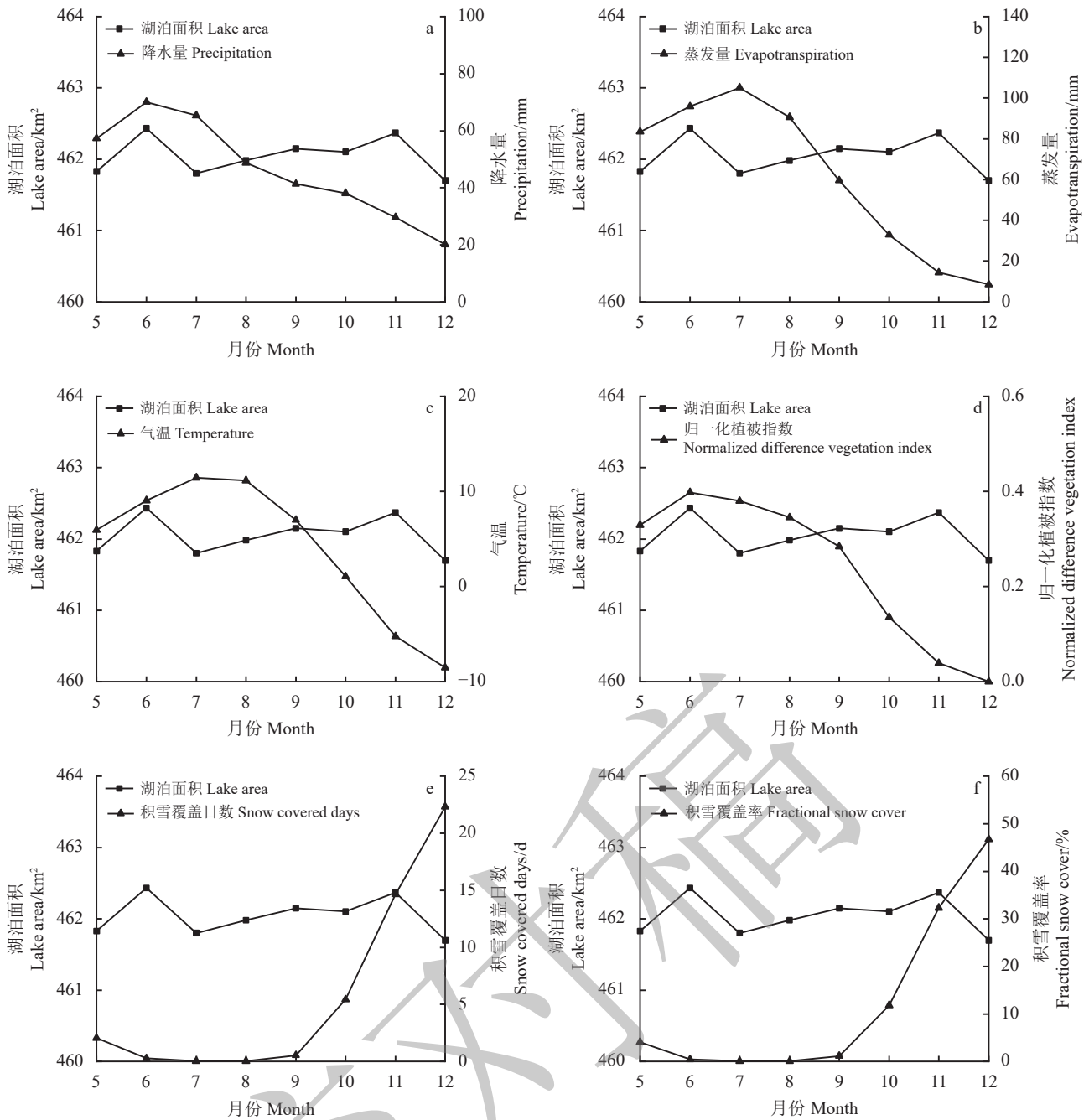


图 6 2000—2020 年 5 月—12 月赛里木湖湖泊面积和流域环境因子的月际变化情况

Figure 6 Monthly changes in the lake area and environmental factors of the Sailimu Lake Basin from May to December from 2000 to 2020

气温 > 积雪覆盖日数 > 积雪覆盖率。从分析结果看, 年降水量增加是导致湖泊面积扩张的主要因素, 赛里木湖流域暖湿化促使了湖泊周边生态环境的改善, 使周边植被的水源涵养能力提升, 进一步促使了湖泊扩张。流域年均温上升会导致蒸发量增加, 但不足以抵消入湖径流的水量, 在蒸发量年际变化变大的背景下, 赛里木湖依然保持扩张的态势。积雪日数和积雪覆盖率的解释力相较其他因子略

低, 但积雪融水对春季湖泊面积增加的贡献是很大的。虽然因子探测结果表明各个因子对湖泊扩张均具有一定的解释力, 但显著性检验结果并不理想, P 值远大于 0.05, 这可能受不同因子月季变化的影响, 与年际变化分析的结果并不一致。因为在各个因子年际变化均呈现增加趋势的背景下, 湖泊面积、水位也随之在增加, 说明湖泊变化肯定是由环境因子控制的。

表 1 地理探测器因子探测结果
Table 1 Detection results of Geodetector

影响因素 Impacting factor	<i>q</i> 值 <i>q</i> -value	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value	<i>q</i> 值排序 Sorting of <i>q</i> -values
降水量 Precipitation	0.986	0.563	1
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.975	0.608	2
蒸发量 Evapotranspiration	0.933	0.923	3
气温 Temperature	0.798	0.999	4
积雪覆盖日数 Snow covered days	0.784	0.984	5
积雪覆盖率 Fractional snow cover	0.755	0.996	6

3 讨论与结论

湖泊变化受到自然因素和人为因素的共同影响。自然因素包括地质构造、气候变化、补给条件等,人为因素包括灌溉用水、生活用水等。赛里木湖属于高山内陆湖泊,受人类干扰较少,而气候变化(气温、降水量、蒸发量等)对其影响更为显著,因此本研究着重探讨了气候和湖泊周边环境变化对赛里木湖的影响。研究结果表明,2000—2020 年期间,赛里木湖整体呈现扩张趋势,湖面面积不断扩

张,水位上升,20 年间由 460.05 km² 增长到了 463.48 km²,水位上升了 1.28 m,湖泊面积动态达到 0.036 %,与王宇等^[22]和马道典等^[23]得出 1985—2014 年赛里木湖水位不断上升,湖水体积不断扩张的结论相一致。赛里木湖扩张与流域地形密切相关,受流域地形限制,空间上水体主要朝地势平坦的西部扩张。

赛里木湖的扩张受多种因素影响。分析结果显示 20 年间赛里木湖流域气候向暖湿化转变,气温升高,降水增加且达到显著水平。在暖湿化背景下,赛里木湖流域的生态环境得到极大的改善,促进了湖泊周边植被水源涵养能力的提高。这些因素直接导致了赛里木湖近年来不断扩张,水位也在不断上升。从各因子年际和月际变化趋势上看,对赛里木湖在不同时期的扩张幅度都有很好的解释力,说明气候暖湿化以及生态环境改善是导致湖泊扩张的因素,其中降水增加是主要原因。

本研究以高山内陆湖赛里木湖为研究对象,研究了内陆湖对气候变化的响应,研究结果可为研究湖泊变化驱动力以及应对气候变化,合理的水资源管理措施奠定了一定的基础。但径流数据的缺乏使本研究的部分假设得不到验证,后期会收集更多的数据,对高山内陆湖泊的变化机理做更深入的研究。

参考文献 References:

[1] 王国亚, 沈永平, 王宁练, 吴青柏. 气候变化和人类活动对伊塞克湖水位变化的影响及其演化趋势. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1097-1105.
WANG G Y, SHEN Y P, WANG N L, WU Q B. The effects of climate change and human activities on the lake level of the Issyk-kul during the past 100 years. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6): 1097-1105.

[2] 曾林, 牛晓俊, 豆永丽, 边多, 周刊社. 西藏多庆错和嘎拉错面积变化及气候要素分析. 高原科学研究, 2021, 5(1): 27-34.
ZENG L, NIU X J, DOU Y L, BIAN D, ZHOU K S. Analysis on the changes in area and meteorological factors of Duoqing Lake and Gala Lake in Tibet. Plateau Scientific Research, 2021, 5(1): 27-34.

[3] 刘艳. 加强赛里木湖生态环境保护保障区域生态安全. 环境与可持续发展, 2016, 41(4): 206-208.
LIU Y. To strengthen Sayram Lake ecological environment protection for its regional ecological security. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(4): 206-208.

[4] 张毅, 孔祥德, 邓宏兵, 孔春芳, 李文杰. 近百年湖北省湖泊演变特征研究. 湿地科学, 2010, 8(1): 15-20.
ZHANG Y, KONG X D, DENG H B, KONG C F, LI W J. Change characteristic of lakes in Hubei Province in the past 100 years. Wetland Science, 2010, 8(1): 15-20.

[5] 于雪英, 江南. 基于 RS、GIS 技术的湖面变化信息提取与分析: 以艾比湖为例. 湖泊科学, 2003, 15(1): 81-84.
YU X Y, JIANG N. Analyzing lake area change in Ebinur by integration of RS and GIS technique. Journal of Lake Sciences, 2003,

- 15(1): 81-84.
- [6] 刘志锋, 朱卫红, 南颖, 森本幸裕, 王琪, 赵洋. 基于 Corona 和 Spot-5 影像的图们江下游敬信湿地变化研究. *湿地科学*, 2009, 7(3): 237-242.
- LIU Z F, ZHU W H, NAN Y, YUKIHIRO M, WANG Q, ZHAO Y. Change of Jingxin wetland in the lower reaches of Tumen River based on Corona and Spot-5 Images. *Wetland Science*, 2009, 7(3): 237-242.
- [7] GUIRGUIS S K, HASSAN H M, EL-RAEY M E, HUSSAIN M M A. Technical note multi-temporal change of Lake Brullus, Egypt, from 1983 to 1991. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(15): 2915-2921.
- [8] LI L, WANG W. The response of lake change to climate fluctuation in north Qinghai-Tibet Plateau in last 30 years. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(2): 131-142.
- [9] XU H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [10] 王世江. 中国新疆河湖全书. 北京: 中国水利水电出版, 2011.
- WANG S J. Encyclopaedia of Xinjiang's Rivers and Lakes. Beijing: China Water & Power Press, 2011.
- [11] 范唯唯. NASA 成功发射 ICESat-2 卫星. *空间科学学报*, 2018, 38(6): 843.
- FAN W W. NASA successfully launched ICESat-2 satellite. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(6): 843.
- [12] 文汉江, 程鹏飞. ICESAT/GLAS 激光测高原理及其应用. *测绘科学*, 2005, 30(5): 33-35.
- WEN H J, CHENG P F. Introduction to principle of ICESAT/GLAS laser altimetry and its applications. *Science of Surveying and Mapping*, 2005, 30(5): 33-35.
- [13] 么嘉棋, 唐新明, 李国元, 艾波, 杨雄丹, 谢栋平. 激光测高卫星 ICESat-2 云检测及其相关算法. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 240-248.
- YAO J Q, TANG X M, LI G Y, AI B, YANG X D, XIE D P. Cloud detection of laser altimetry satellite ICESat-2 and the related algorithm. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 240-248.
- [14] GHOSH K G. Analysis of rainfall trends and its spatial patterns during the last century over the Gangetic West Bengal, Eastern India. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2018, 2(2): 15.
- [15] LI X, CHENG G D, GE Y C, LI H Y, HAN F, HU X L, TIAN W, TIAN Y, PAN X D, NIAN Y Y, ZHANG Y L, RAN Y H, ZHENG Y, GAO B, YANG D W, ZHENG C M, WANG X S, LIU S M, CAI X M. Hydrological cycle in the Heihe River Basin and its implication for water resource management in endorheic basins. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2018, 123(2): 890-914.
- [16] ZHANG G Q, YAO T D, PIAO S L, TOBIAS B, XIE H J, CHEN D L, GAO Y H, Catherine M, O'Reilly, C. K. Shum, YANG K, YI S, LEI Y B, WANG W C, HE Y, SHANG K, YANG X K, ZHANG H B. Extensive and drastically different alpine lake changes on Asia's high plateaus during the past four decades. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 252-260.
- [17] ZHOU J, WANG L, ZHANG Y S, GUO Y H, HE D. Spatiotemporal variations of actual evapotranspiration over the Lake Selin Co and surrounding small lakes (Tibetan Plateau) during 2003—2012. *Science China Earth Science*, 2016, 59(12): 2441-2453.
- [18] 张国庆. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展. *地理科学进展*, 2018, 37(2): 214-223.
- ZHANG G Q. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations. *Progress in Geography*, 2018, 37(2): 214-223.
- [19] 马明国, 宋怡, 王雪梅. 1973—2006 年新疆若羌湖泊群遥感动态监测研究. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 189-195.
- MA M G, SONG Y, WANG X M. Dynamically monitoring the lake group in Ruoqiang County. *Xinjiang region. Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 189-195.
- [20] 韩永强. 赛里木湖大西洋的最后一滴眼泪. *中国三峡*, 2017(12): 98-101.
- HAN Y Q. Sailimu Lake the last tear of the Atlantic ocean. *China Three Gorges*, 2017(12): 98-101.
- [21] 葛婷婷, 周金龙, 张杰, 孙英. 赛里木湖面积变化特征及驱动因子分析. *新疆农业大学学报*, 2020, 43(5): 342-349.
- GE T T, ZHOU J L, ZHANG J, SUN Y. Variation characteristics of Sarim Lake area and driving force analysis. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2020, 43(5): 342-349.
- [22] 王宇, 李均力, 郭木加甫, 包安明, 胡汝骥, 赵胜楠. 1989—2014 年赛里木湖水面面积的时序变化特征. *干旱区地理*, 2016,

- 39(4): 851-860.
- WANG Y, LI J L, GUO M J X, BAO A M, HU R J, ZHAO S N. Time-series analysis of Sayram Lake area changes during 1989—2014. *Arid Land Geography*, 2016, 39(4): 851-860.
- [23] 马道典, 张莉萍, 王前进, 曾庆江, 姜逢清, 王亚俊, 胡汝骥. 暖湿气候对赛里木湖的影响. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 219-223.
- MA D D, ZHANG L P, WANG Q J, ZENG Q J, JIANG F Q, WANG Y J, HU R J. Influence of the warm-wet climate on Sailimu Lake. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 219-223.
- [24] KWOK R, ZWALLY H J, YI D H. ICESat observations of Arctic sea ice: A first look. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(16): 1-5.
- [25] MARKUS T, NEUMANNT, MARTINO A, ABDALATI W, BRUNT K, CSATHO B, FARRELL S, FRICKER H, GARDNER A, HARDING D, JASINSKI M, KWOK R, MAGRUDER L, DAN L B, LUTHCKE S, MORISON J, NELSON R, ZWALLY J. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [26] PENG S Z, DING D M, LIU W Z, LI Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [27] GAO B C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257-266.
- [28] HUANG X D, XIE H J, LIANG T G, YI D H. Estimating vertical error of SRTM and map-based DEMs using ICESat altimetry data in the eastern Tibetan Plateau. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(18): 5177-5196.
- [29] ZHANG G Q, CHEN W F, XIE H J. Tibetan Plateau's Lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and landsat missions. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 13107-13118.
- [30] 李宁, 刘吉平, 王宗明. 2000—2010 年东北地区湖泊动态变化及驱动力分析. *湖泊科学*, 2014, 26(4): 545-551.
- LI N, LIU J P, WANG Z M. Dynamics and driving force of lake changes in northeast China during 2000-2010. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(4): 545-551.
- [31] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, LIAO L Y, ZHANG T, GU X, ZHENG X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [32] WANG J F, HU Y. Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling and Software*, 2005, 33: 114-115.
- [33] HARTMANN H C. Climate change impacts on Laurentian Great Lakes levels. *Climatic Change*, 1990, 17(1): 49-67.
- [34] JONES R N, MCMAHON T A, BOWLER J M. Modelling historical lake levels and recent climate change at three closed lakes, Western Victoria, Australia. *Journal of Hydrology*, 2001, 246(1/4): 159-180.

(责任编辑 魏晓燕)