

文章编号: 1672-8785(2025)01-0045-08

基于 Google Earth Engine 的 1985~2023 年 蒙古国地表水体的时空变化分析

廖堂宏 哈斯巴干*

(上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234)

摘 要: 水是人类社会生产发展的基础资源。随着遥感技术与云计算技术的不断发展, 谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台成为了大规模和长期的地表水体分析与制图的重要手段。采用 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 卫星数据, 分析了 1985~2023 年 6 月至 9 月的蒙古国地表水体的时空变化特征。研究表明, 1985~2023 年蒙古国地表水体的面积呈下降趋势, 稳定水体面积从 15547.71 km² 缩减至 14452.13 km²。其中, 大型水体保持相对稳定, 主要是小型湖泊和河流发生变化。本文的分析结果为深入了解蒙古国的生态环境变化提供了重要的基础, 并为准确预测蒙古国未来的水资源和环境变化以及水资源的有效管理和保护提供了方向。

关键词: 地表水体; Landsat 卫星; 谷歌地球引擎; 时空分布; 蒙古国

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.01.006

Analysis of Spatial-Temporal Variations of Surface Water Bodies in Mongolia During 1985—2023 Based on Google Earth Engine

LIAO Tang-hong, HASI Ba-gan*

(School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Water is a basic resource for the development and production of human society. With the continuous development of remote sensing technology and cloud computing technology, the Google Earth Engine (GEE) platform has become an important means for large-scale and long-term surface water bodies analysis and mapping. Using Landsat 5 TM and Landsat 8 OLI satellite data, the spatial-temporal variation characteristics of surface water bodies in Mongolia from June to September 1985—2023 are analyzed. The results show that the area of surface water bodies in Mongolia showed a downward trend from 1985 to 2023, and the area of stable water bodies decreased from 15547.71 km² to 14452.13 km². Among them, large water bodies remained

收稿日期: 2024-08-14

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2022YFE0119500); 上海市科技计划项目(22010503600)

作者简介: 廖堂宏(2000-), 男, 广西河池人, 硕士研究生, 主要从事水体遥感方面的研究。

*通讯作者: E-mail: hasibagan@staff.shnu.edu.cn

relatively stable, and small lakes and rivers changed mainly. The analysis results of this paper provide an important basis for an in-depth understanding of the ecological and environmental changes in Mongolia, and provide a direction for accurately predicting the future water resources and environmental changes in Mongolia and the effective management and protection of water resources.

Key words: surface water body; Landsat satellite; Google Earth Engine; spatial-temporal distribution; Mongolia

0 引言

水是人类社会生产的基础资源^[1]。蒙古国是一个内陆国家,其水资源分布具有独特性。该国的地表水资源主要集中在湖泊、河流和地下水中,其中距离人口集中地区较远的地区拥有较为丰富的水资源。然而,由于蒙古国的干旱气候和地理条件,地表水资源在分布上存在不均衡性,同时受到全球气候变化的影响。蒙古国的许多地区已经面临水资源紧缺和水质下降的问题,对农业、畜牧业和人类的生活造成了直接影响^[2]。

至今为止,已有多项研究专注于蒙古国水体的检测。Zou Z 等人对蒙古高原上不连续和弯曲水体的检测进行了研究^[3]; Tao S 等人研究了蒙古高原上湖泊数量的减少以及相关的驱动因素^[4]; 高彦哲等人基于 Landsat 遥感影像对蒙古高原的湖泊变化进行了监测^[5]。辽阔的地表和技术限制了对蒙古国全境地表水体详细变化的系统研究。总之,目前仍然需要进行全面的、长期的地表水体变化研究,以满足该地区的研究需求。

卫星遥感记录了跨越空间和时间的综合数据, Landsat 影像也被广泛用于检测地理区域内水体的范围和分布情况^[6]。近年来,基于云计算的技术取得了巨大的进展,在大规模土地覆盖制图领域具有巨大潜力。其中, GEE 作为一个专注于地理数据处理和分析的云平台,提供了大规模的全球地理空间数据和许多优秀的图像处理算法,使研究人员能够以固有的并行处理方式快速处理数百万幅影像。这些优势使他们能够以较小的成本和设备进行大规模和长期的分析(包括地表水体制图)^[7-9]。

在本次研究中,我们基于 GEE 平台上的 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 影像数据集,提取了 1985~2023 年蒙古国的地表水体信息。然后对过去 38 年间蒙古国地表水体的时空变化进行了深入分析,探讨了地表水面积变化的驱动因素。该研究旨在揭示水文循环的潜在机制和过程,为制定和优化应对气候变化的策略提供了科学依据。

1 研究区及研究数据

1.1 研究区概况

蒙古国位于蒙古高原上,东、南、西部与中国接壤,北部与俄罗斯相邻。蒙古国的面积约为 1.5665×10^6 km²,西部地势较高、东部较低,平均海拔为 1580 m。该国属于温带干旱半干旱气候,年均降水量约为 200~300 mm,降水主要集中在夏季,北部的降水明显多于南部。蒙古国的土壤类型主要包括高山草甸冻土、山地森林草甸土壤、黑土、栗土等。从北到南,植被类型包括高山草甸、原始森林草原、草原等^[10]。

1.2 数据来源

GEE 是由谷歌公司提供的专门用于处理卫星图像和其他地球观测数据的云端运算平台,能够在线可视化地分析和处理大规模的全球地球科学数据。GEE 不仅为用户提供了丰富的卫星影像数据集,还包括高程数据、气象数据和人口统计数据等多种资料。考虑到数据的可获得性以及逐年监测的需求,本研究选择了具有 30 m 空间分辨率且时间连续性好、时间跨度长的 Landsat 系列数据。通过 GEE 云处理平台,我们获取了 1985~2023 年内每年 6 月 1 日至 9 月 1 日期间的 Landsat 数据,包括

Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 的顶层大气反射率影像。由于蒙古国北方的冰雪覆盖期长达 150 天, 可用的遥感影像数量受限。根据实际影像效果, 选取 1985~2009 年 Landsat 5 影像数据, 并以 5 年为间隔进行水体提取; 而对 2010~2012 年数据, 则以 3 年为间隔进行水体提取。对于 Landsat 8 数据, 分为 2013~2016 年、2017~2019 年、2020~2023 年三个时间区间进行水体提取。

2 研究方法

2.1 生成地表水体方法

本研究使用了美国地质调查局(USGS) Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 表面反射影像。这些影像都是经过了标准的二级地形校正的正射校正影像(时间跨度为 1985 年 1 月 1 日至 2022 年 9 月 1 日), 可以直接在 GEE 平台上调用。在处理中使用 BQA 波段识别了质量较差的观测数据, 包括云、云阴影、卷云、冰雪以及扫描线校正器缺失的情况。所有 Landsat 影

$$water = \begin{cases} 1 & EVI < 0.1 \text{ 且 } (mNDWI > EVI \text{ 或 } mNDWI > NDVI) \\ 0 & \end{cases} \quad (4)$$

采用式(4)对范围内的所有像元进行计算。 $water$ 是二值量: 当像元满足 $EVI < 0.1$ 且 $(mNDWI > EVI \text{ 或 } mNDWI > NDVI)$ 条件时, 赋值为 1, 表示水体; 否则赋值为 0, 表示非水体。该算法最先由 Zou Z 等人提出^[3], 之后在水体相关的遥感研究中有具体应用^[14]。

本研究统计了 1995~2023 年蒙古国境内的所有像元被观测到的次数以及被分类为水体的次数。计算像元出现水体的频率, 并设置 3 个区间来区分植被类型: 水体频率在 75%~100% 之间的水像元被定义为稳定水体; 水体频率在 25%~75% 之间的水像元被定义为临时水体; 水体频率在 0%~25% 之间时, 则认为该像元是水体或者是云雾等难以剔除的杂质噪点, 在统计时将不被统计在水体像元中, 有效提高了对水体判定的准确性。而总水体则被认为是稳定水体和临时水体的总和。

像的预处理任务都在 GEE 平台中完成。

基于质量良好的观测数据, 计算了两种广泛使用的植被指数和一个与水相关的光谱指数: 规范化差异植被指数(NDVI)、增强植被指数(EVI)以及修改的标准化差异水指数($mNDWI$)。

NDVI 和 EVI 与植被绿度有关, 而 $mNDWI$ 对开放式地表水体敏感。这些指数已被广泛用于识别植被^[11-12] 和开放式地表水体^[13], 具体公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1} \quad (2)$$

$$mNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{swir}}{\rho_{green} + \rho_{swir}} \quad (3)$$

式中, ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{red} 、 ρ_{nir} 、 ρ_{swir} 在 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 影像中分别表示蓝光、绿光、红光、近红外、短波红外波段。

水体检测公式为

2.2 技术路线

本研究大致由三部分组成: 第一部分主要介绍本研究的遥感数据和影像预处理; 第二部分主要介绍 GEE 平台上的水提取方法, 并通过验证得到有效的水体结果; 第三部分主要分析长时间序列的地表水体变化情况(见图 1)。

3 结果与分析

1985~1989 年, 蒙古国境内地表总水体面积约为 15547.71 km², 占该国总面积的 0.994%; 稳定水体面积约为 14251.21 km², 占该国总面积的 0.911%。2020~2023 年, 地表总水体面积缩减到 14452.13 km² 左右, 占该国总面积的 0.924%; 稳定水体面积约为 13317.49 km², 占该国总面积的 0.851%(见表 1)。

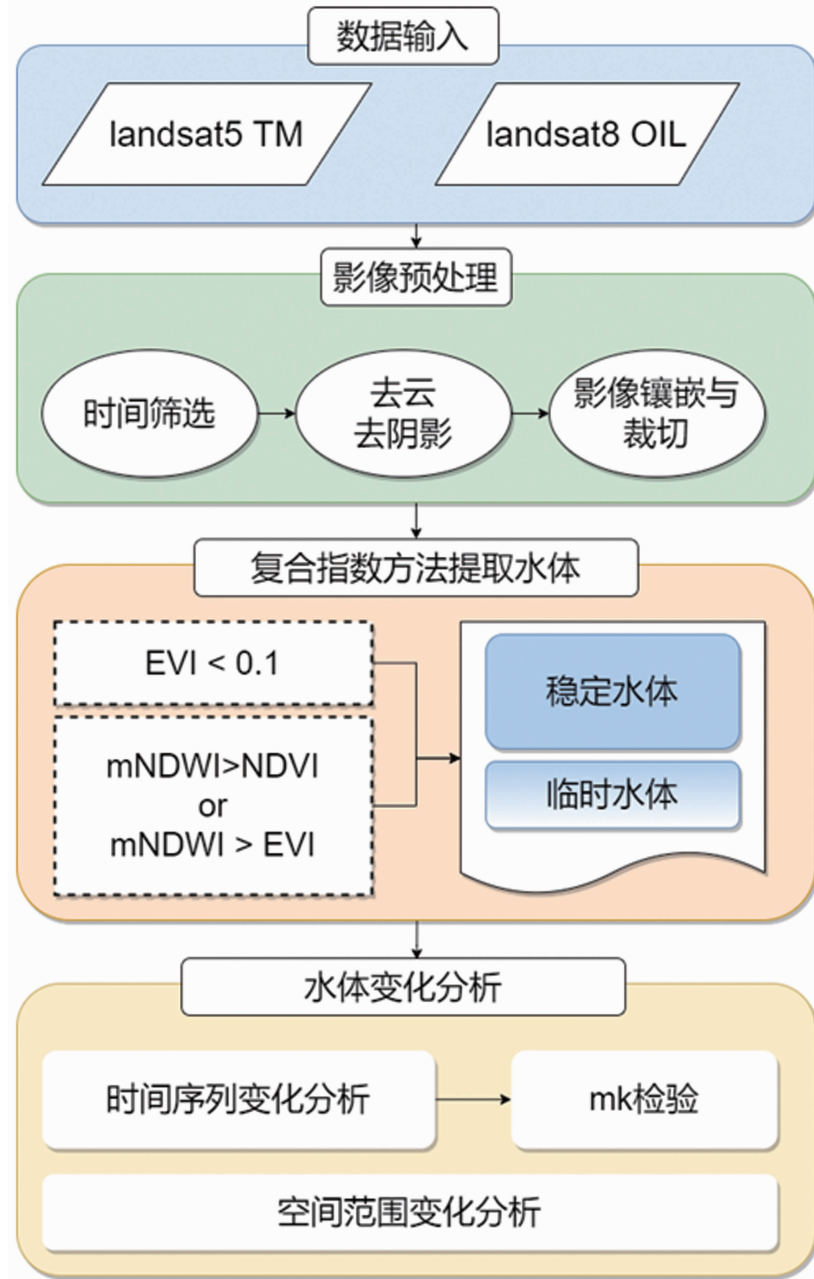


图1 技术路线流程图

表1 1985~2023年蒙古国的地表水体面积数据

年份	总水体面积/km ²	稳定水体面积/km ²
1985~1989	15547.71	14251.21
1990~1994	16063.33	14586.59
1995~1999	15640.68	14633.17
2000~2004	15077.4	14183.17
2005~2009	14639.47	13864.03
2010~2012	15042.25	14012.04
2013~2015	14502.96	13767.27
2016~2019	14110.63	12933.22
2020~2023	14452.13	13317.49

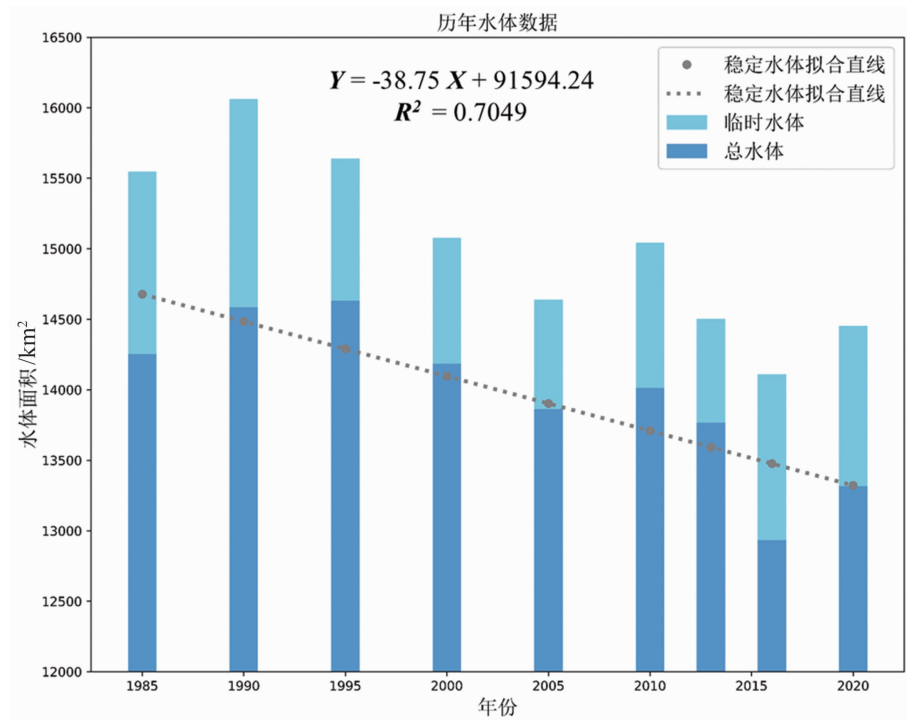


图 2 1985~2023 年蒙古国地表水体面积柱状图

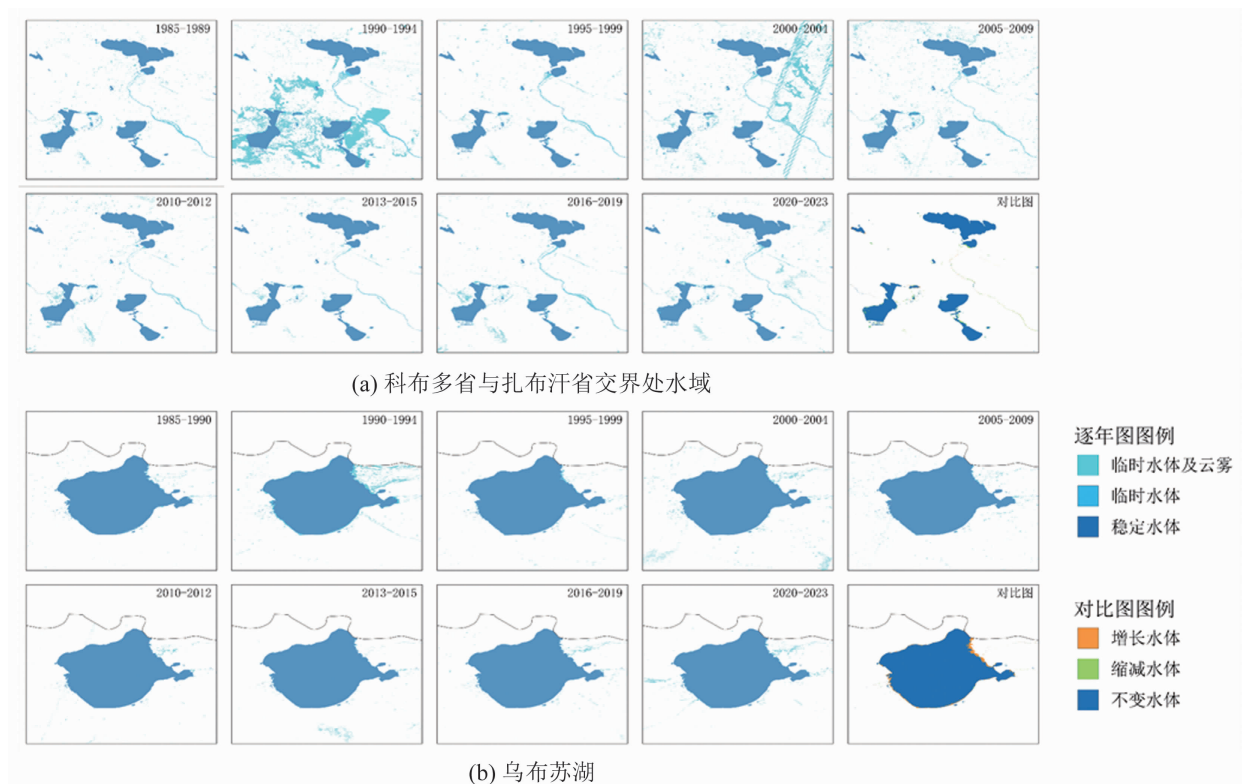


图 3 1985~2023 年蒙古国局部水体变化对比图

如图 2 所示, 1985~2023 年蒙古国地表水体面积呈现典型的振荡减少的趋势。地表总水体面积在 16063.33 ~ 14110.63 km² 之间变化。

1985~1989 年地表总水体面积比平均值 15086.98 km² 高 3.05% 左右, 2020~2023 年地表总水体面积比平均值低 4.21%。地表稳

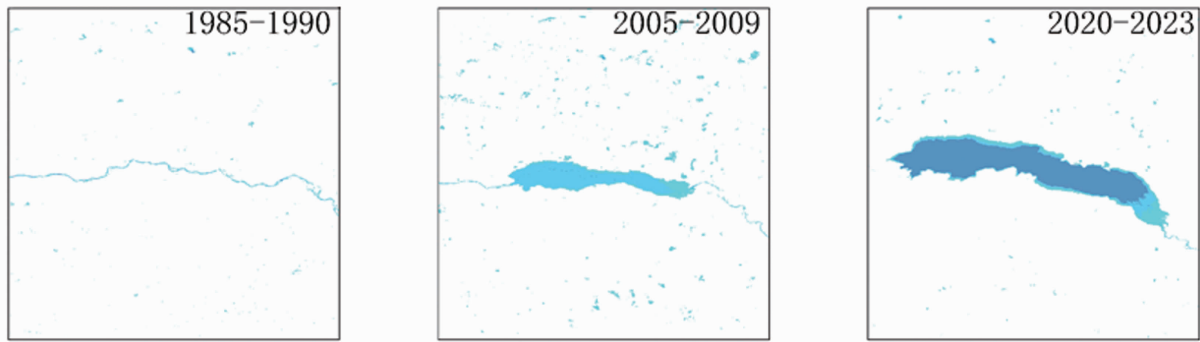


图4 蒙古国格金湖演变情况

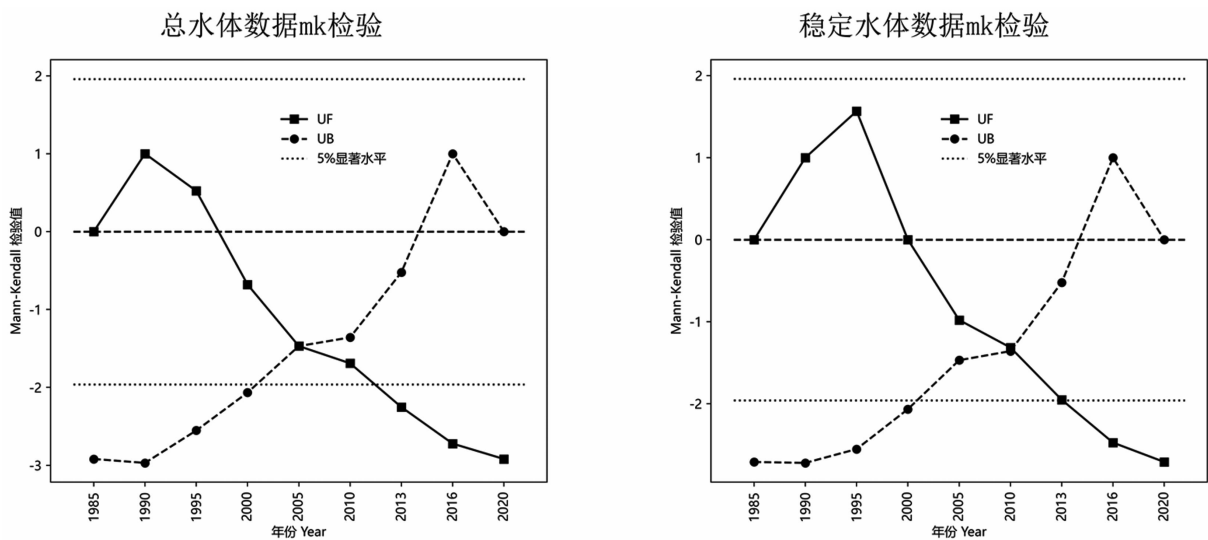


图5 MK 趋势检验图

定水体面积在 14633.17~12933.22 km² 之间变化, 1985~1989 年地表稳定水体面积比平均值 13783.19 km² 高 3.40% 左右, 2020~2023 年地表稳定水体面积比平均值低 3.38%。根据线性回归模型, 在过去 38 年里, 蒙古国地表水面积每年减少 38.75 km², 但在 2016 年之后水体面积有回升现象。

1985~2023 年, 蒙古国境内地表水体的空间分布呈现出一定的分异特征, 且地表水体的变化体现为大型湖泊保持相对稳定, 小型水体和部分河流发生了萎缩。地表水分布相对集中在蒙古国的北部和西部以及某些内陆盆地地区, 大部分地表水地区属于内陆河流域和湖泊。例如, 库苏古尔湖位于蒙古国的北部, 靠近俄罗斯边境, 是蒙古国最大的深水湖泊之一, 也是世界上最深的淡水湖之一, 在蒙古国

地表水中占有相当大的比例; 吉尔吉斯湖是蒙古西部大湖盆地的一个咸水湖, 是蒙古国的第四大湖泊; 格金湖在蒙古国内地表水面积总体缩减的情况下, 有较明显的增加, 展现了地区变化的特异性。

如图 3(a) 所示, 蒙古国西部科布多省与扎布汗省交界处存在较为密集的水域, 分布着吉尔吉斯湖、哈尔湖与艾拉格湖等湖泊与河流。可以看出, 艾拉格湖出现了萎缩现象, 其下游河道也出现了改道现象。如图 3(b) 所示, 蒙古国水域面积最大的湖泊——乌布苏湖的水体面积从 3477.93 km² 扩张到了 3587.69 km²。可以看出, 乌布苏湖在东北部有逐年扩张的现象。

为了满足蒙古国在能源领域的需求, 位于湖源的泰希尔水电站和附属水坝于 2008 年建

成, 之后形成了格金湖湖泊, 而且湖泊面积一直在不断扩张(见图 4)。人类活动也是对蒙古国境内水体造成影响的一大原因。

此外, MK 趋势检验结果证实, 1995~2000 年蒙古国地表总水体面积减少, 自 2000 年来稳定水体面积减少。而且 2010~2013 年地表总水体减少趋势通过了 5% 的显著性检验 ($\alpha=0.05$), 地表稳定水体自 2013 年来的减少趋势通过了 5% 的显著性检验, 表明在此期间蒙古国地表总水体以及稳定水体都显著减少(见图 5)。

蒙古国的水体受到冰川和积雪融化的季节性影响, 导致地表水在一年内表现出明显的季节性变化。本研究选用 6 月 1 日至 9 月 1 日期间的影像, 以减小冰雪对水体检测的干扰。然而, 这也导致了有效影像数量较少, 同时拉长了研究的单位时间尺度, 可能会对水体检测的准确性产生一定的影响。此外, 由于其他季节性的水体信息不足, 大气降水、冰川融水、湖泊蒸发以及其他因素在不同尺度上对水体循环的影响尚未可知。其次, 蒙古国的影像受云雾影响, 使得遥感影像难以连续观测, 降低了数据的可用性, 也对水体提取的准确性产生了影响。本研究采用了多指数水体检测方法, 但在划定水体边界时, 有些情况下边界并不清晰, 特别是在像素混合区域(如狭窄的河流和水域湖泊的边界), 仍然存在一定程度的误差。综合考虑这些影响因素, 需要基于本研究的结果思考未来的数据处理和校正方法, 以提高后续研究的可靠性和准确性。

4 结束语

本研究利用 GEE 平台与 Landsat 5 TM、Landsat 8 OLI 影像识别并提取了 1985~2023 年蒙古国地表水体, 系统分析了蒙古国地表水的时空变化。结果表明, 1985~2023 年蒙古国地表水体的面积呈下降趋势, 稳定水体从 15547.71 km² 缩减至 14452.13 km²。大型水体则保持相对稳定, 主要是小型水体和河流发生变化, 人类活动是造成水体变化的一个重要

因素。

蒙古国的水资源相对稀缺, 大部分地区处于干旱或半干旱气候条件, 因此地表水资源对当地的生活、农业和生态系统至关重要。这项研究为深入了解蒙古国的生态环境变化奠定了重要基础, 同时为准确预测未来的水资源和环境变化提供了关键参考, 并为水资源的有效管理和保护指明了方向。

参考文献

- [1] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. *Science*, 2006, **313** (5790): 1068-1072.
- [2] Liang X, Li P, Wang J, et al. Research progress of desertification and its prevention in Mongolia [J]. *Sustainability*, 2021, **13**(12): 6861.
- [3] Zou Z, Dong J, Menarguez M A, et al. Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984-2015 [J]. *Sci Total Environ*, 2017, **595**: 451-460.
- [4] Tao S, Fang J, Zhao X, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, **112**(7): 2281-2286.
- [5] 高彦哲, 阿拉腾图娅, 晏娜, 等. 2000-2020 年蒙古高原湖泊变化及其影响因素分析 [J]. *干旱区地理*, 2023, **46**(2): 191-200.
- [6] Frazier P S, Page K J. Water body detection and delineation with Landsat TM data [J]. *Photogramm Eng Remote Sensing*, 2000, **66** (12): 1461-1468.
- [7] Li Y, Niu Z, Xu Z, et al. Construction of high spatial-temporal water body dataset in China based on Sentinel-1 archives and GEE [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(15): 2413.
- [8] Zhou S, Kan P, Silbernagel J, et al. Application of image segmentation in surface water extraction of freshwater lakes using radar data [J]. *ISPRS Int J Geoinf*, 2020, **9**(7): 424.
- [9] 刘焱焱, 田恬, 曾鹏, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的 1984-2018 年太湖水域变化特征 [J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(9): 3163-3172.
- [10] Gunin P D, Vostokova E A, Dorofeyuk N I, et

- al. Vegetation dynamics of Mongolia [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [11] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change [J]. *Trends Ecol Evol*, 2005, **20**(9): 503–510.
- [12] Galvao L S, Dos Santos J R, Roberts D A, et al. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: A case study with MODIS and hyperspectral data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(9): 2350–2359.
- [13] Wang Y, Huang F, Wei Y. Water body extraction from LANDSAT ETM+ image using MNDWI and KT transformation [C]. Kaifeng: 21st International Conference on Geoinformatics, 2013.
- [14] Wang X, Xiao X, Zou Z, et al. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986–2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **238**: 110987.