西北大学学报(自然科学版)
2026 年 10 月,第 56 卷第 5 期,Oct. ,2026,Vol. 56,No. 5
Journal of Northwest University (Natural Science Edition)

·水资源·

基于 GEE 平台的 1990—2020 年洞庭湖水域演变特征及归因分析

吴　浪[1],李苗苗[1],施　睿[2],王高旭[2],许　怡[2],白烨坤[1],宋欣颖[1],古鹏飞[1,2]

1. 江西科技师范大学 土木工程学院,江西 南昌　330013;
2. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室,江苏 南京　210029

摘要　湖泊水是我国重要的淡水资源,具有防洪抗旱、维护生物多样性等关键生态服务功能,是社会经济发展的自然基础条件。然而,ENVI 等传统遥感处理软件耗时费力,难以实现长时序、动态的水域变化观测。因此,以谷歌地球引擎(Google Earth Engine,GEE)遥感云计算平台为基础,利用 Landsat 5/7/8 和 Sentinel-1 遥感影像数据,分析 1990—2020 年洞庭湖的水域演变特征,并结合气象数据和土地利用数据,揭示了湖泊面积变化的驱动因素。结果表明:①1990—2020 年间,洞庭湖年最大水域面积总体呈下降趋势,春季和冬季水域面积变化较为稳定,夏季和秋季水域面积变化较为显著,丰水期湖泊面积波动较大,显著高于枯水期;②丰水期湖泊水面主要向西南和东南扩张,枯水期主要在湘江流域和东部低洼地区收缩;③研究期间,洞庭湖流域气温呈上升趋势,降水量整体呈下降趋势,推动了湖泊面积的收缩;④研究期间,大量水域转化为耕地和建设用地,水域面积整体下降,加剧了湖泊面积的减少。综上,研究可为湖泊水体动态监测提供新思路,并为湖泊水资源的可持续利用、生态系统保护以及区域水资源管理提供科学依据。

关键词　水体动态监测;洞庭湖;谷歌地球引擎;遥感大数据;水体指数法

中图分类号:K9　　**DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-05-010

Evolution characteristics and attribution analysis of Dongting Lake waters from 1990 to 2020 based on GEE platform

Wu Lang[1], Li Miaomiao[1], Shi Rui[2], Wang Gaoxu[2], Xu Yi[2],
Bai Yekun[1], Song Xinying[1], Gu Pengfei[1,2]

1. School of Civil Engineering, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330013, China;
2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China

Abstract　Lake water is an important fresh water resource in China, which has key ecological service functions such as flood control, drought resistance and biodiversity maintenance, and is a natural basic condition for social and economic development. However, traditional remote sensing processing software such as ENVI is

收稿日期:2026-03-11　　修回日期:2026-03-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3900602,2023YFC3006501,2023YFC3006504-04);国家自然科学基金(42075191);南京水利科学研究院科学基金(Y524008);江西省学位与研究生教研项目(JXYJG-2022-168)。

第一作者:吴浪,男,副教授,博士,从事土木水利工程建造与管理研究,wulang19812005@126.com。

通信作者:古鹏飞,男,讲师,博士,从事遥感水文研究,gupengfei2020@163.com。

time-consuming and laborious, and it is difficult to realize long-time and dynamic observation of water changes. Therefore, based on the remote sensing cloud computing platform of Google Earth Engine (GEE), this paper analyzes the water evolution characteristics of Dongting Lake from 1990 to 2020 by using the remote sensing image data of Landsat 5/7/8 and Sentinel-1, and reveals the driving factors of lake area change by combining meteorological data and land use data. The results show that: ① From 1990 to 2020, the annual maximum water area of Dongting Lake showed a downward trend; the change of water area in spring and winter is relatively stable, and the change of water area in summer and autumn is more obvious; the lake area fluctuates greatly in wet season, which is significantly higher than that in dry season. ② During the wet season, the water surface of the lake mainly expands to the southwest and southeast, while during the dry season, it mainly shrinks in the Xiangjiang River basin and the low-lying areas in the east. ③ During the study period, the temperature in Dongting Lake basin showed an upward trend, and the overall precipitation showed a downward trend, which promoted the shrinkage of the lake area. ④ During the study period, a large number of water areas were converted into cultivated land and construction land, and the overall water area decreased, which aggravated the reduction of lake area. To sum up, this study can provide new ideas for dynamic monitoring of lake water, and provide scientific basis for sustainable utilization of lake water resources, ecosystem protection and regional water resources management.

Keywords　dynamic monitoring of water Body; Dongting Lake; GEE; remote sensing big data; water index method

湖泊水是我国重要的淡水资源之一,具有保障饮用水安全、防洪抗旱、维护生物多样性等关键生态服务功能[1]。由于人类活动的不可持续性和气候变化的双重影响,全球湖泊面临严重威胁。据统计,过去 50 年间,我国每年约有 20 个天然湖泊消亡[2],湖泊蓄水量减少约 5.13×10^{11} m^3,湖泊水体面积缩小约 1.86×10^4 km^2,占现有湖泊总面积的 26.3%[3]。因此,对湖泊进行水体动态变化监测,分析湖泊水域的演变特征,揭示气候与人类活动对湖泊面积变化的影响具有重要意义[4]。

随着全球对地观测系统的建立以及遥感技术的快速发展,遥感数据的时间分辨率、空间分辨率和光谱分辨率不断提高[5],快速、高效、精确地从遥感影像上提取水体信息,已经成为水体动态变化分析、水资源管理等研究的重要手段[6-7]。然而,ENVI 等传统遥感处理软件需要使用者将影像下载至本地端,并经几何校正、辐射定标和大气校正等复杂预处理后才能提取正确水体,耗时费力[8];面对星球尺度和海量的遥感影像,难以实现长时序的、动态的水域变化观测。谷歌地球引擎(Google Earth Engine,GEE)是一个强大的遥感云计算平台,被广泛应用于水体动态监测[9-12]、土地利用变化[13-14]等研究领域。李忠勤等[15]基于 GEE 遥感云计算平台,运用 Landsat 影像和 MODIS 数据,采用水体指数法分析了博斯腾湖面积变化趋势;赵勇等[16]利用 GEE 云平台获取了京津冀平原区长时间序列的水体面积,发现京津冀平原区水面面积在逐渐增加。

洞庭湖是中国第二大淡水湖[17],在保障饮用水安全、防洪抗旱等方面具有举足轻重的作用[18-21]。近年来,由于人类活动的不可持续和气候变化的双重影响,洞庭湖水体面积不断缩小。据统计,1949 年洞庭湖面积为 4 300 km^2,到 20 世纪 90 年代末,湖泊面积减少至 2 579.2 km^2[22],湖泊蓄洪能力大幅下降。目前,已有相关学者利用遥感技术对洞庭湖水体进行了相关研究。例如,李景刚等[23]利用 MODIS 数据分析了洞庭湖水体面积的变化特征和趋势,发现了洞庭湖水体具有十分显著的季节性特征;宋春桥等[24]利用 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像提取了 2017—2020 年洞庭湖水域面积信息,得出了洞庭湖显著的季节波动和年际变化特征。上述研究为洞庭湖的水体动态监测相关研究做出了重要贡献,但只使用单一遥感数据源在时间、空间和光谱分辨率上存在一定局限性。

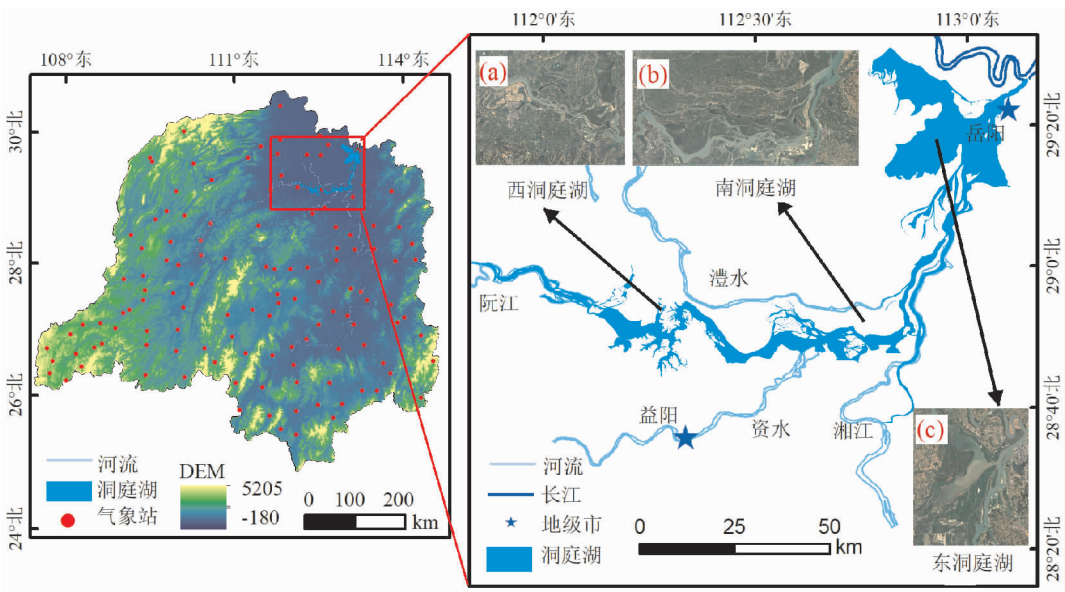
本研究基于 GEE 遥感云计算平台,结合 Landsat 5/7/8 遥感影像和 Sentinel-1 遥感影像,提取 1990—2020 年间洞庭湖的水体信息,计算了不同时间尺度(年、月、季)的水体面积,深入探讨了洞庭湖水域的时空演变特征,并结合气象与土地

利用数据,分析了气候变化和人类活动对洞庭湖水域面积变化的影响,以期为湖泊水资源的可持续利用、生态系统保护以及区域水资源管理提供参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

洞庭湖,古称云梦,位于湖南省北部,纳"四水"(湘江、资江、沅江和澧水),与长江水系相连,发挥着"调蓄水量"的重要作用(见图 1)。根据 2019 年《中国河流水沙公报》,洞庭湖流域年均水量为 2 843 × 108 m^3,占长江年总水量的 31.83%,相当于鄱阳湖流域的 1.89 倍,是长江中下游地区重要的调蓄和防洪屏障[25-29]。洞庭湖流域地跨 7 省,涵盖 183 个县(市),南北长约 470 km,东西宽约 555 km,是中国最大的淡水湿地[30],具有至关重要的生态功能,对长江流域的水文调节、渔业资源的提供以及生态服务有着极其重要的作用。



注:(a)西洞庭湖图;(b)南洞庭湖图;(c)东洞庭湖图;(a)~(c)的背景均为 20190930 期 Sentinel-2 真彩色影像

图 1 研究区

Fig. 1 Study area

1.2 数据来源

1.2.1 卫星遥感影像数据

1)Landsat 系列影像数据。Landsat 系列卫星是由美国国家航空航天局推出的一系列遥感卫星,用于地球表面变化的长期监测,是世界上运行时间最长的民用遥感卫星计划。为实现洞庭湖长时间序列湖水面积动态监测,本研究基于 GEE 平台选取了覆盖洞庭湖且云覆盖率低于 30% 的 landsat 5/7/8 遥感影像数据用于水体信息提取。

2)Sentinel-1 影像数据。Sentinel-1 是欧洲航天局 2014 年 4 月 3 日发射的对地观测卫星,由 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 两颗处于同一轨道平面的极轨卫星组成,载有 C 波段 SAR 传感器,不受光、云、雨等恶劣天气条件影响,可实现全天时全天候的观测,可有效弥补光学影像在丰水期较少的不足。Sentinel-1 与光学遥感卫星 Landsat 系列结合使用,可以提供更全面的地表信息。因此,本研究选取了 2015—2020 年的 Sentinel-1 影像数据用于水体信息提取。

1.2.2 气象数据

为分析气候变化对洞庭湖水域面积的影响,本文以洞庭湖流域为边界,提取流域内所有气象站的 1990—2020 年逐日降水和气温数据(见图 1),并对数据进行了年、季和月 3 个尺度的处理。气象数据来自中科院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=230)。

1.2.3 土地利用数据

中国土地覆盖数据集(China land cover dataset,CLCD)自 2021 年被杨杰等[31]开发后,被广泛应用于生态环境监测、城市规划及全球变化等研究[32-36],截至到 2025 年 2 月累计被引 1 500 余次。与全球 30 m 精细分类土地覆盖数据(Global

Land Cover with Fine Classification System at 30 m，GLC_FCS30）、全球 30 m 土地覆盖数据集（Global 30 m Land Cover Dataset，GlobeLand30）以及中国国家土地利用/覆盖变化数据集（China national land use/cover change，CNLUCC）等数据集相比，CLCD 在全国范围内的分类精度最高，优于国际同类产品[37]。因此，为了分析人类活动对湖泊面积的影响，本文以洞庭湖流域为边界，基于 GEE 平台，利用 CLCD 提取了 1990—2020 年洞庭湖流域土地利用数据，并使用地理信息系统（GIS）技术对土地利用数据进行空间分析。

2　研究方法

基于 GEE 平台的 1990—2020 年洞庭湖水域演变特征及归因分析主要包括 3 个步骤。第 1 步。利用 GEE 遥感云计算平台获取 1990—2020 年间洞庭湖流域的遥感影像数据和土地利用数据，为后续分析奠定数据基础。第 2 步。利用 GEE 遥感云计算平台，结合 Landsat 5/7/8 和 Sentinel-1 影像，获取 1990—2020 年间洞庭湖在年尺度、季尺度、月尺度上的水体面积；对气象数据进行年、季、月 3 个尺度的处理；根据土地利用数据计算洞庭湖流域的土地利用转移矩阵。第 3 步。根据湖泊面积数据，从年、季、月尺度分析洞庭湖水域时空变化特征；基于水域面积数据和气象数据，分析气温和降水量的变化对湖泊面积的影响；结合土地利用数据，分析人类活动对湖泊面积变化的影响。研究流程图如图 2 所示。

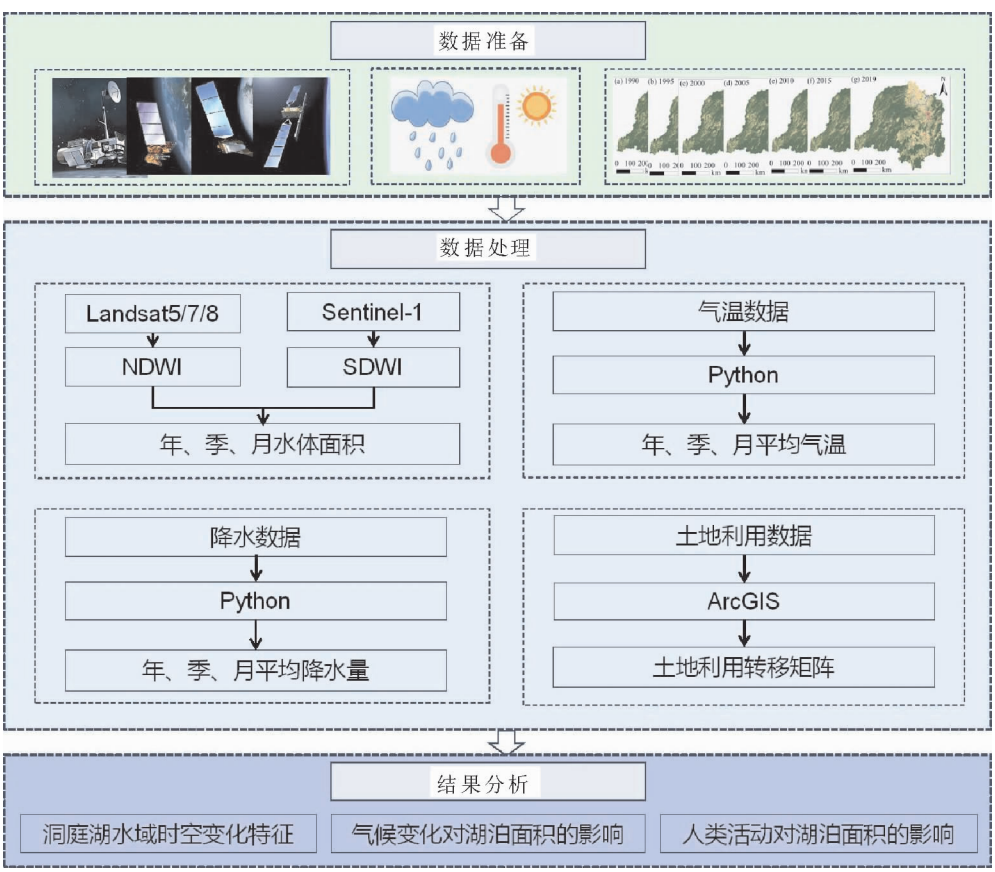


图 2　研究流程图

Fig. 2　Research flow chart

2.1　NDWI 指数法

NDWI 是根据归一化差异植被指数 NDVI 的构建原理，利用近红外波段和绿波段的光谱反射特性，通过计算两者的归一化差值，实现陆地、水体和植被的区分[38]。在洞庭湖流域，与 MNDWI、EWI 等水体指数相比，基于 NDWI 的水体提取精度最高[39]。其计算公式为

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \tag{1}$$

式中：Green 代表绿色光波段；NIR 则指近红外光波段。由于水体提取精度受阈值选择影响较大，不同研究区域阈值也会有差异，因此本文使

用Otsu最佳阈值法自动提取水体和非水体的分割阈值。

2.2 SDWI 指数法

基于 Sentinel-1 双极化数据的 SDWI 水体信息提取[40],结合水体与地表目标的后向散射特性,通过构建指数公式实现水体与其他地表目标的分离,*VV* 和 *VH* 两种极化通道能够更好地区分水体与其他地物,尤其在复杂地形和湿地环境中,因此,该方法水体提取精度也较高。其计算公式为

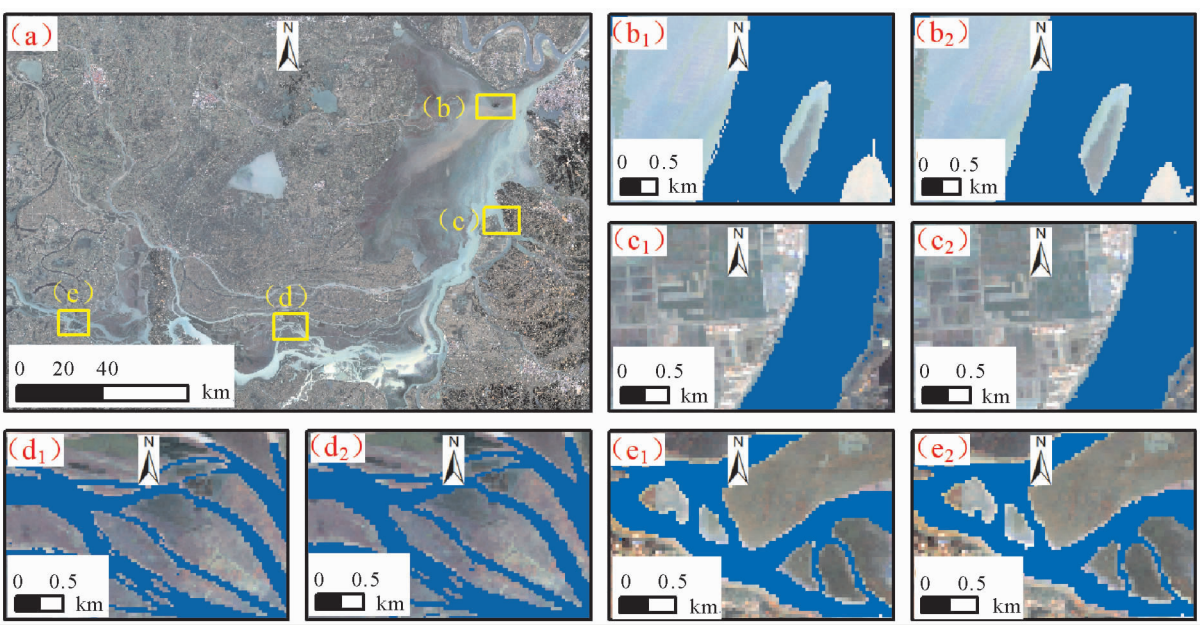
$$K_{SDWI} = \ln(10 \times VV \times VH) - 8 \quad (2)$$

式中:K_{SDWI}为 SDWI 水体指数值,该值大于 0 时识别为水体,*VV*、*VH* 分别为 Sentinel-1 双极化 *VV*、*VH* 波段的后向散射系数。在实际应用中,由于研究区域不同,水体提取阈值可能不为 0,因此,本文采用人工目视法,通过多次实验来调整和确定阈值。

3 结果

3.1 水体提取效果分析

NDWI 和 SDWI 能有效提取地表水体(见图 3),在复杂水体环境中具有较好的适用性,如复杂江心洲附近水体〔见图 3(b)〕、城市化区域附近水体〔见图 3(c)〕以及辫状水体区域〔见图 3(d)-(e)〕,能够较准确地提取水体信息。



注:(a)20191230 Sentinel-2 真彩色影像;(b_1)~(e_1)为 NDW1 提取效果;(b_2)~(e_2)为 SDW1 提取效果

图 3 水体提取效果

Fig. 3 Water extraction effect

3.2 洞庭湖水域的时间动态变化

3.2.1 年尺度湖泊面积变化

1990—2020 年,洞庭湖年最大面积总体表现为下降趋势〔见图 4(a)〕,其中,1990—2001 年间年最大面积整体呈上升趋势,在 2001 年达到最大值约 3 000 km^2,较其平均值(约为 1 845 km^2)高出 62.6%,2002—2020 年间整体呈下降趋势。年最小面积总体表现为上升趋势〔见图 4(b)〕,其中,1990—1999 年间年最小面积总体呈上升趋势,2000—2016 年间,水体面积较前几年有所下降,2006 年湖泊面积达到最小值约 243 km^2,比其平均值(约为 441 km^2)低 44.9%,2017—2020 年间,年最小面积总体呈上升趋势。

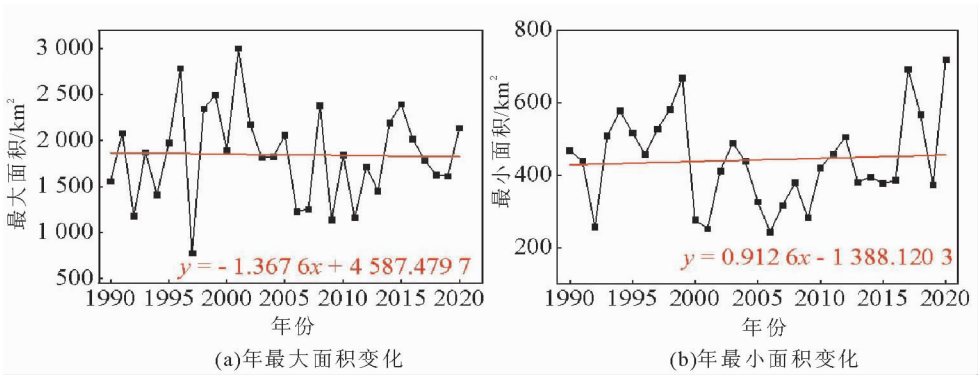


图 4　1990—2020 年洞庭湖年尺度面积变化

Fig. 4　Annual scale area change of Dongting Lake from 1990 to 2020

3.2.2　季尺度湖泊面积变化

1990—2020 年,洞庭湖水域面积呈现出显著的季节性变化。春季〔见图 5(a)〕湖泊面积整体呈下降趋势,夏季〔见图 5(b)〕、秋季〔见图 5(c)〕和冬季〔见图 5(d)〕湖泊面积整体呈上升趋势。春季湖泊最大面积出现在 2003 年,面积约为 1 798 km^2,是平均值(约 844 km^2)的 2.1 倍;夏季湖泊最大面积出现在 2001 年,面积约 3 000 km^2,较平均值(约 2 290 km^2)高出 31%。秋季湖泊面积最高出现在 2001 年,面积约为 2 796 km^2,冬季湖泊面积最高出现在 2016 年,面积约为 891 km^2。其中,夏季和秋季水域面积变化较为显著,春季和冬季水域面积变化相对较为稳定。

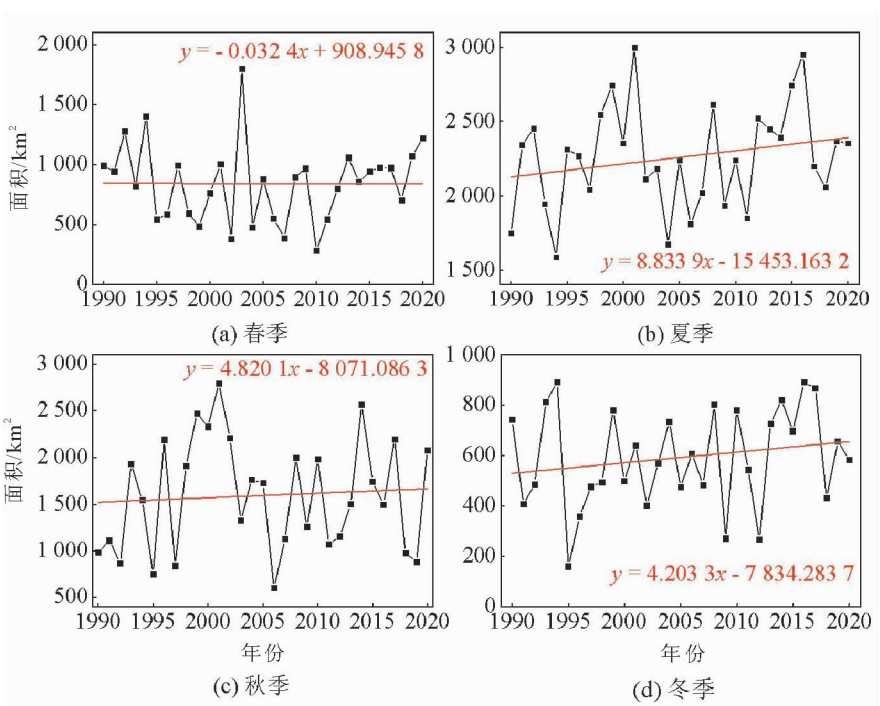


图 5　1990—2020 年洞庭湖季尺度面积变化

Fig. 5　Seasonal scale area change of Dongting Lake from 1990 to 2020

3.2.3　月尺度湖泊面积变化

根据图 6,洞庭湖湖泊面积在 1 月至 3 月较小,4 月进入增长期,水体面积显著扩大,7 月和 8 月的水体面积达到全年最高值,9 月略有回落,10 月水体面积开始减小,11 月和 12 月进入枯水期,水体面积保持在较低水平。其中,1 月、2 月和 12 月的面积分布相对集中,水体面积年际变化较为稳定,5 月、8 月、9 月和 10 月的面积波动较大,年

际变化较为显著。

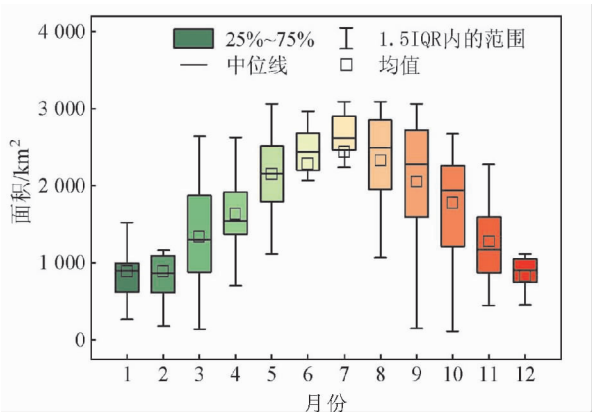


图 6 1990—2020 年洞庭湖月度面积变化

Fig. 6 Monthly area change of Dongting Lake from 1990 to 2020

3.3 洞庭湖的空间动态变化

每年丰水期时,洞庭湖湖区水面扩张,尤其是在西南和东南区域,水域面积显著增加,覆盖范围达到顶峰。枯水期时,湖泊水面收缩,尤其是在湘江流域和东部低洼区域,水域收缩形成了典型蝶形湖特征,导致大量孤立水体的形成,该现象在 1990、2005 和 2015 年尤为显著(见图 7)。

3.4 洞庭湖水域变化的归因分析

3.4.1 气候变化对湖泊变化的影响分析

1)年尺度气候变化对湖泊面积的影响。作为典型的平原湖泊,洞庭湖的水域面积受气温和降水量的双重影响。降水量的变化直接影响入湖河流的径流量,减少了湖泊水源补给,从而引发湖泊面积的缩小;气温的升高将加剧流域内水分的蒸发,进一步加速湖泊面积收缩。1990—2020 年间,洞庭湖流域降水量整体呈下降趋势(见图 8),降水量每年平均减少约 2.08 mm;在 2011 年降水量达到最低值,同年洞庭湖面积较前几年也有所减少〔见图 4(a)〕。湖泊面积与年降水量之间呈正相关关系〔见图 9(a)〕,降水量的减少导致湖泊面积的收缩;洞庭湖流域气温整体呈上升趋势(见图 8),湖泊面积与年均气温之间呈负相关关系〔见图 9(b)〕,洞庭湖流域年均气温由 17.17 ℃上升到 19.33 ℃,上升了 2.16 ℃,这一升温趋势加剧了水分蒸发,进一步推动湖泊面积的收缩。

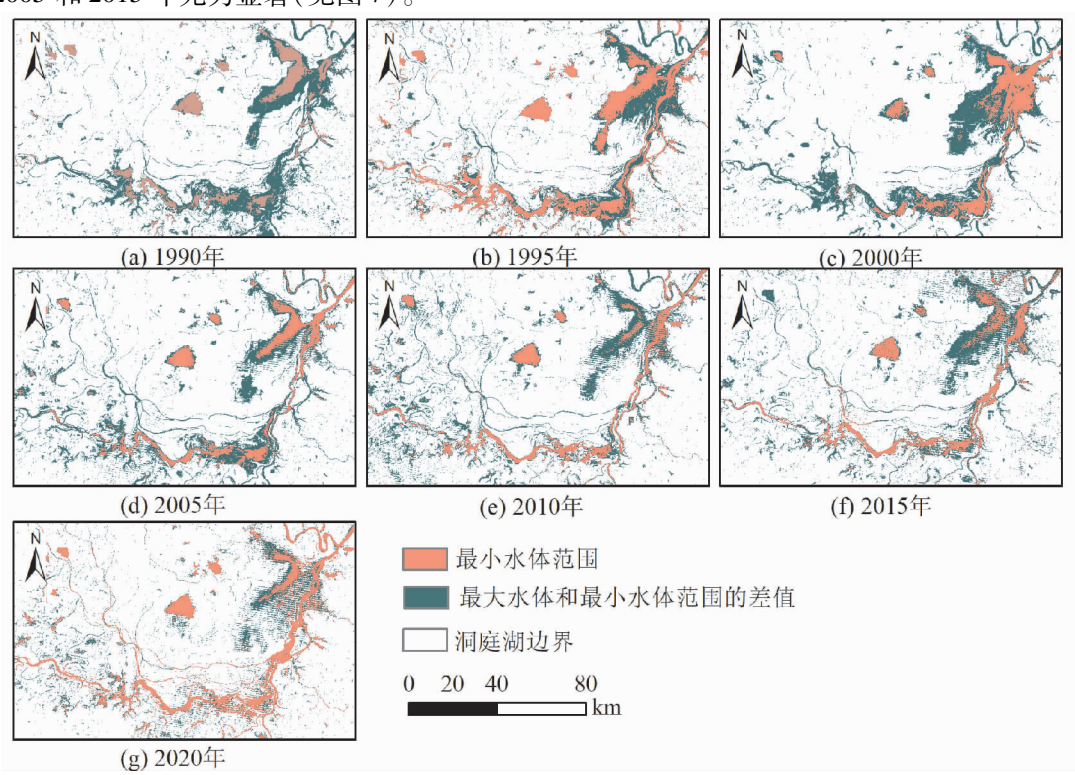


图 7 洞庭湖 1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020 年的年度最大和最小水体范围

Fig. 7 Annual maximum and minimum water area of Dongting Lake in 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020

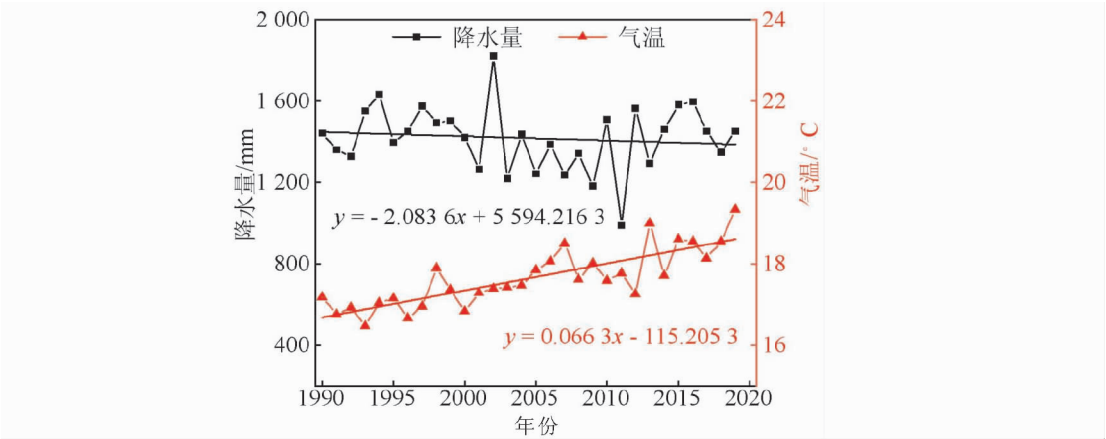
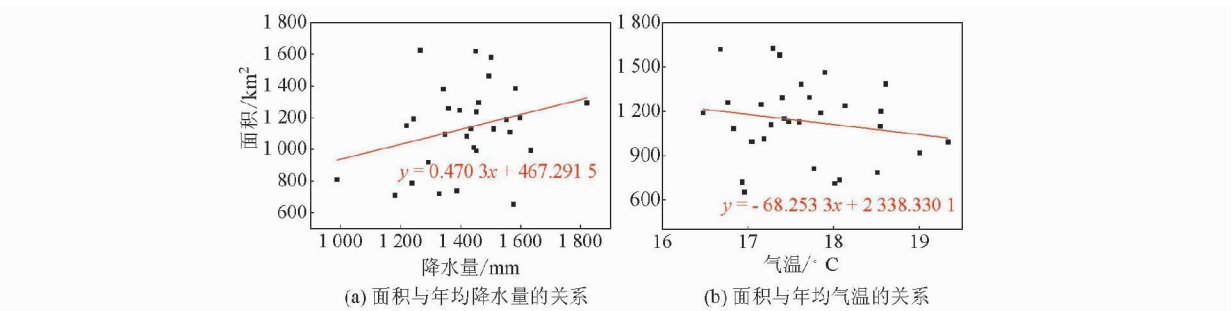


图 8　1990—2020 年年均降水量和气温变化

Fig. 8　Annual average precipitation and temperature changes from 1990 to 2020



(a) 面积与年均降水量的关系　　(b) 面积与年均气温的关系

图 9　1990—2020 年湖泊面积与年均降水量、年均气温间的关系

Fig. 9　Relationship between lake area and average annual precipitation and average annual temperature from 1990 to 2020

2)季尺度气候变化对湖泊面积的影响。春季〔见图 10(a)〕降水量整体呈下降趋势,气温整体呈上升趋势,推动了湖泊面积的收缩,且湖泊面积变化相比夏季、秋季较为细微;夏季〔见图 10(b)〕、秋季〔见图 10(c)〕降水量呈现增加—减少—增加—减少的波动变化,且降水量较高,气温整体呈上升趋势,降水量和气温对湖泊面积的双重影响,导致湖泊面积变化较为显著;冬季〔见图 10(d)〕降水量较少且呈下降趋势,气温呈上升趋势,湖泊面积与其他季节相比相对稳定。

3.4.2　人类活动对湖泊变化的影响分析

通过对 1990—2020 年洞庭湖流域土地利用变化(见图 11)的分析,洞庭湖流域的主要土地利用类型包括水域、耕地、林地、灌木、草地、裸地和不透水面(建设用地)。研究期间大量水域转变为耕地,水域面积逐渐减少是湖泊面积减少的主要因素之一;农业用地的变化以及森林和草地的转化影响了流域水文过程,进一步推动了湖泊面积的变化。

为分析各土地利用类型间的转换,利用 GEE 平台和洞庭湖流域的土地利用分类影像数据(每隔 5 年取一次),对相邻年份的影像进行了对比,得到洞庭湖土地利用类型转移矩阵(见表 1),并分析了各土地利用类型转化的方向和数量。结果表明:1990—2020 年间,洞庭湖流域的水域面积整体呈下降的趋势,1990 年水域面积为 4 914.6 km^2,2020 年水域面积减少至 4 666.58 km^2,减少了 5%,水域主要转化为了耕地,尤其是 2000—2005 年间、2005—2010 年间、2015—2020 年间,分别有 543.71 km^2、425.38 km^2、670.63 km^2 的水域转变为耕地,转移率分别为 10.2%、8.4% 和 12.8%;1990 年洞庭湖流域林地面积为 170 161.68 km^2,到 2020 年减少至 166 376.18 km^2,减少了 2.2%,林地主要转化为了耕地和灌木;1990 年草地面积为 536.86 km^2,到 2020 年减少至 133.05 km^2,草地主要转化为了林地和耕地。土地利用方式的改变影响了洞庭湖流域内的水文过程以及水量供需关系,进而影响了湖泊面积的变化。

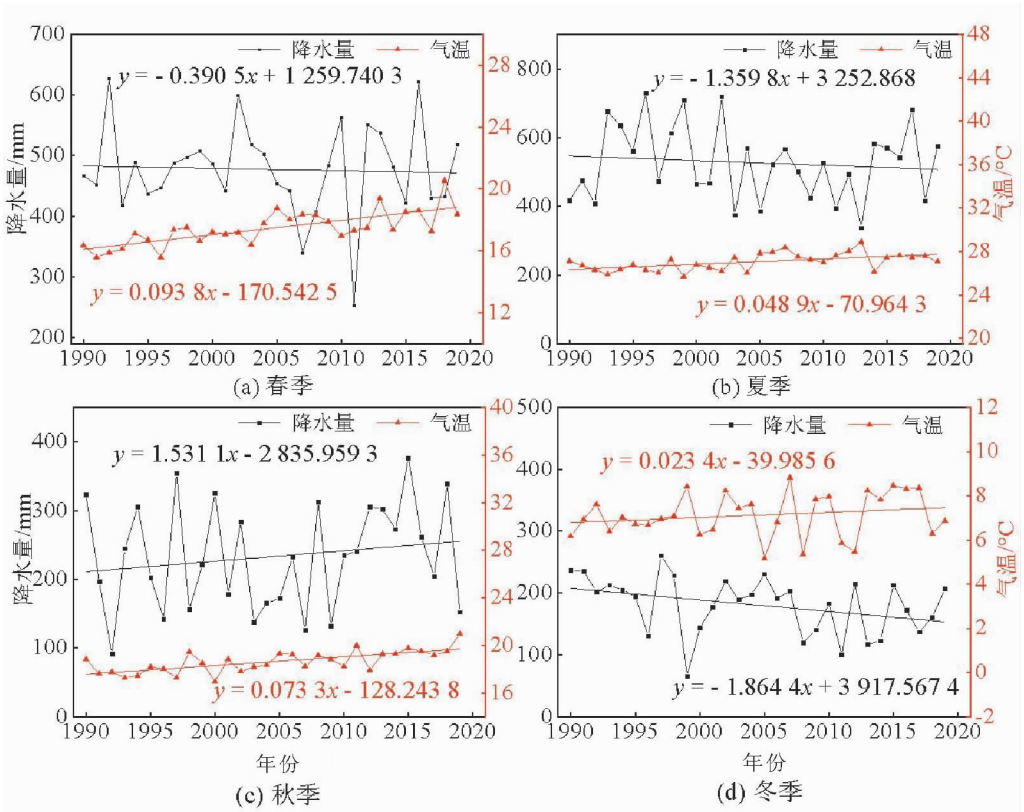


图 10 1990—2020 年四季平均降水量和平均气温变化

Fig. 10 Variation of average precipitation and average temperature in four seasons from 1990 to 2020

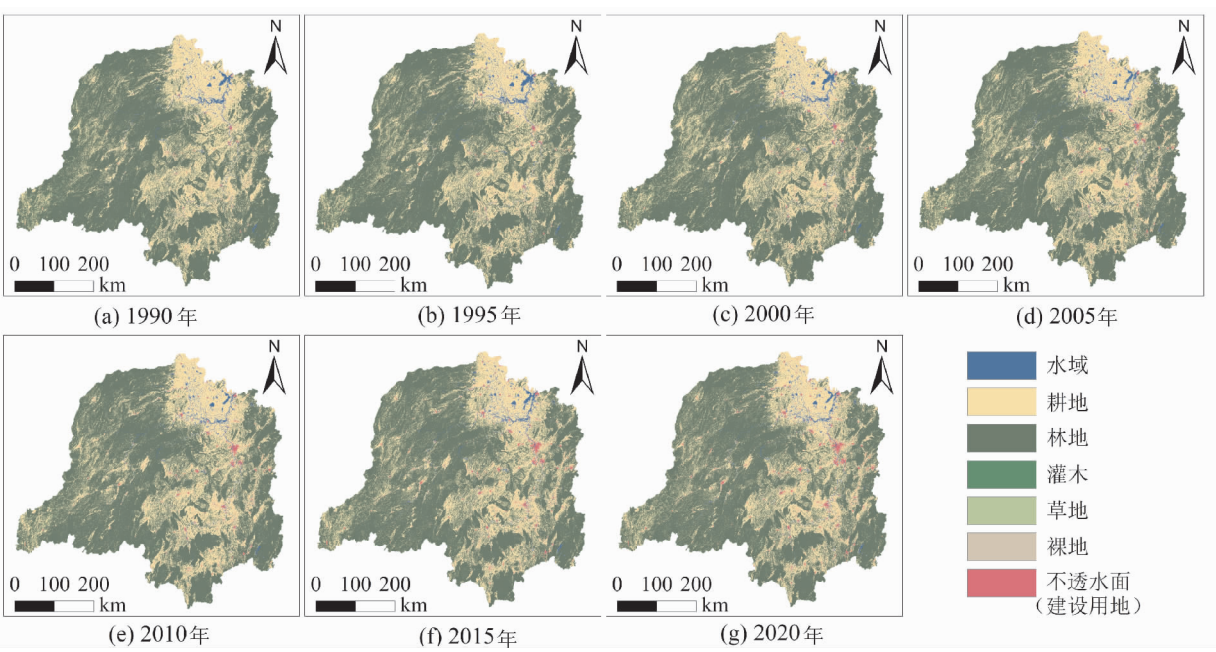


图 11 洞庭湖流域土地利用类型变化

Fig. 11 Changes of land use types in Dongting Lake Basin

表 1　1990—2019 年各阶段洞庭湖流域土地利用转移矩阵

Tab. 1　Land use transfer matrix of Dongting Lake Basin in different stages from 1990 to 2019　　单位: km^2

1995 年	1990 年						
	水域	耕地	林地	灌木	草地	裸地	不透水面
水域	4 664. 99	457. 79	1. 46	0. 00	5. 22	0. 46	45. 27
耕地	198. 32	74 503. 17	4 320. 60	65. 90	87. 19	0. 05	0. 56
林地	37. 47	7 622. 11	165 691. 82	563. 21	216. 84	0. 00	0. 01
灌木	0. 00	31. 33	131. 86	842. 09	39. 31	0. 00	0. 00
草地	0. 29	22. 57	0. 83	7. 86	185. 43	0. 06	0. 00
裸地	0. 04	0. 01	0. 00	0. 00	0. 20	0. 54	0. 00
不透水面	13. 49	289. 41	15. 11	0. 00	2. 67	0. 13	1 860. 18
2000 年	1995 年						
	水域	耕地	林地	灌木	草地	裸地	不透水面
水域	4 860. 40	405. 06	0. 82	0. 00	2. 36	0. 06	32. 03
耕地	272. 97	74 602. 29	6 956. 67	72. 51	33. 26	0. 02	0. 03
林地	15. 50	3 675. 86	166 872. 44	255. 61	57. 65	0. 00	0. 02
灌木	0. 00	52. 05	276. 03	713. 64	16. 89	0. 00	0. 00
草地	0. 65	25. 50	0. 62	2. 82	104. 13	0. 07	0. 00
裸地	0. 04	0. 00	0. 00	0. 00	0. 10	0. 56	0. 00
不透水面	25. 62	415. 01	24. 88	0. 00	2. 66	0. 07	2148. 92
2005 年	2000 年						
	水域	耕地	林地	灌木	草地	裸地	不透水面
水域	4 702. 69	290. 31	0. 30	0. 00	1. 42	0. 09	28. 72
耕地	543. 71	77 363. 06	5 709. 04	123. 58	30. 31	0. 01	0. 51
林地	19. 54	3 836. 36	164 964. 02	228. 98	19. 26	0. 00	0. 00
灌木	0. 00	59. 47	161. 53	701. 60	6. 35	0. 00	0. 00
草地	1. 20	19. 57	1. 26	4. 43	74. 48	0. 18	0. 01
裸地	0. 01	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 42	0. 00
不透水面	33. 6	368. 98	40. 93	0. 00	1. 99	0. 02	2 587. 90
2010 年	2005 年						
	水域	耕地	林地	灌木	草地	裸地	不透水面
水域	4 550. 52	318. 52	0. 97	0. 00	1. 34	0. 00	50. 55
耕地	425. 38	79 037. 83	6 838. 79	119. 65	26. 10	0. 01	0. 39
林地	13. 37	3 680. 35	162 063. 62	275. 99	7. 31	0. 00	0. 00
灌木	0. 00	27. 71	96. 47	520. 36	2. 29	0. 00	0. 00
草地	0. 71	34. 31	3. 77	12. 93	59. 33	0. 03	0. 00
裸地	0. 02	0. 04	0. 00	0. 00	0. 03	0. 34	0. 00
不透水面	33. 51	671. 45	64. 55	0. 02	4. 73	0. 04	2982. 49
2015 年	2010 年						
	水域	耕地	林地	灌木	草地	裸地	不透水面
水域	4 608. 02	545. 50	0. 87	0. 00	2. 29	0. 01	55. 93
耕地	285. 25	78 988. 18	6 072. 79	112. 78	34. 89	0. 25	0. 15
林地	5. 51	6 049. 72	159 796. 52	210. 66	7. 70	0. 00	0. 00
灌木	0. 00	16. 42	105. 11	313. 54	2. 19	0. 00	0. 00
草地	0. 24	66. 88	2. 23	9. 85	57. 82	0. 03	0. 00
裸地	0. 02	0. 03	0. 00	0. 00	0. 04	0. 12	0. 00
不透水面	22. 86	781. 44	63. 11	0. 01	6. 14	0. 03	3 700. 71

续表 1

2020 年	2015 年						
	水域	耕地	林地	灌木	草地	裸地	不透水面
水域	4 509.61	138.52	0.46	0.00	0.31	0.00	17.68
耕地	670.63	79 005.27	5 272.14	58.53	38.56	0.02	0.40
林地	4.86	5 553.25	160 651.34	158.59	8.14	0.00	0.00
灌木	0.00	12.23	91.06	214.72	2.12	0.00	0.00
草地	0.32	51.36	1.92	5.42	74.02	0.01	0.00
裸地	0.08	0.10	0.00	0.00	0.52	0.15	0.00
不透水面	27.14	733.56	53.18	0.01	13.37	0.04	4 556.21

4 讨论

4.1 GEE 用于分析水域演变的优势

GEE 是一种基于云计算的遥感分析平台,具有强大的数据存储、处理和分析能力。GEE 遥感云计算平台包含多源、多尺度的影像数据[41],覆盖全球范围,具有高时间分辨率和空间分辨率,能够满足大尺度、长时序的水体变化监测需求,并支持大规模的并行计算和快速处理,可以实现在云端进行数据的存储、处理和可视化[42],避免了传统方法中庞大的数据下载和本地计算的时间消耗,弥补了传统遥感方法中高时间成本和数据处理的局限性。GEE 平台能够获取长时序的水体面积数据,通过不同时间尺度的变化分析,揭示水域面积的时空演变特征。本研究基于 GEE 遥感云计算平台,结合多源遥感影像,从时间尺度和空间尺度分析了洞庭湖的水体变化,并利用气象数据和土地利用数据评估了气候和土地利用变化对水域面积的影响。

综上,GEE 凭借其强大的数据资源、高效的计算能力和灵活的分析工具,为水域时空演变特征的研究提供了全新的技术手段,其在全球尺度、大数据量和长时间序列水体变化监测中的应用,极大地推动了水资源与环境监测领域的发展。

4.2 重大水利工程建设对洞庭湖水体面积的影响

4.2.1 围垦建垸

围垦建垸是洞庭湖地区人类活动的重要组成部分,对湖泊面积变化产生了深远影响。洞庭湖围垦自明清以来加速发展,移民涌入推动农业由渔业、稻作向垸田种植转变;清初政府鼓励围垦,各州县大规模“与水争地”[43];同治年间泥沙淤积加剧洲滩扩张,围垦到达高潮;民国时期之后,随着四水来沙量的增加,湖区洲滩逐渐淤涨,堤垸面积虽有所扩张,但其增长比例和速率呈下降趋势。1998 年长江特大洪水虽然导致洞庭湖面积短暂扩张至 2 344.33 km^2,但围垦对湖泊面积的长期影响仍然持续,大规模的围堤建垸占据了大量湖泊蓄滞洪水的空间,使洞庭湖削减洪水的能力大幅下降。此外,围垦改变了泥沙沉积模式,垸内沉积中断,而垸外洲滩持续淤涨,形成“垸老田低”的格局,加剧了垸内排水和防洪压力[44]。

4.2.2 三峡大坝工程

三峡大坝采取“蓄清排浑”的调度模式,汛期腾库降低水位以预留防洪库容,枯水期蓄水以补充下游水量并保障水资源供给。这一调度方式改变了长江中下游的水沙输移格局,对支流水系及湖泊生态环境产生了深远影响。作为长江流域的重要调蓄湖泊,洞庭湖所受影响尤为显著。

三峡水库自 2003 年开始蓄水运行后,汛期宜昌站平均流量减少 5.4%,导致进入洞庭湖的水量减少,湖泊面积整体呈下降趋势。每年 10 月三峡水库开始蓄水,在蓄水期拦蓄高达 221.5 亿 m^3[45],使长江干流流量锐减,进而引发湖区水量收缩和湖泊面积减少。相较于三峡水库运行前,洞庭湖年最大水体面积减少约 11%,年最小水体面积减少约 23.6%,局部区域出现大面积滩涂裸露,湖区最低水位屡创新低,使枯水期湖泊面积持续萎缩,生态系统稳定性面临严峻挑战。

5 结论

1)年尺度上,年最大水域面积总体呈下降趋势,2001 年达到峰值,年最小面积总体呈上升趋势;季尺度上,夏季水域面积显著增大,在 2001 年达到最大值,夏季和秋季水域面积变化较为显著,春季和冬季水域面积变化相对较为稳定;月尺度上,1 月、2 月、7 月和 12 月的面积分布相对集中,水体面积变化较为稳定,3 月、5 月、9 月和 10 月的面积波动较大,年际变化较为显著。

2)丰水期,湖泊水面主要向西南和东南方向扩张;枯水期,湖泊水面主要向湘江流域和东部低洼地区收缩,东部地区形成了典型的蝶形湖特征。

3)洞庭湖水域面积与年降水量呈显著正相关,洞庭湖流域降水量呈现下降趋势,且年际波动较大,降水量减少是湖泊面积缩小的主要原因之一;洞庭湖流域年均气温呈上升趋势,湖泊水分蒸发增加,进而影响了湖泊面积变化。

4)洞庭湖流域土地利用类型的变化主要表现为水域、林地和草地面积的减少,耕地和不透水面面积的增加。其中,1990 年水域面积为 4 914.6 km^2,2020 年水域面积减少至 4 666.58 km^2,减少了 5%,水域面积整体呈下降趋势,加剧了湖泊面积的减少。

参考文献

[1] 宋春桥,詹鹏飞,马荣华. 湖泊水情遥感研究进展[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1406-1420.
Song C Q, Zhang P F, Ma R H. Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1406-1420.

[2] 姜尔林. 当代我国公共安全管理的困境与反思:发展主义的视角[J]. 华东理工大学学报(社会科学版), 2013, 28(5): 69-74.
Jiang E L. The dilemma and reflections on contemporary China's public safety management: Perspective of developmentalism[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Social Science Edition), 2013, 28(5): 69-74.

[3] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国生态环境状况与生态文明建设[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6328-6335.
Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The ecological environment conditions and construction of an ecological civilization in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 6328-6335.

[4] 周再文,何贞铭,蒋松谕,等. 多源时序影像洞庭湖流域水体时空演变特征分析[J]. 测绘通报, 2023(10): 20-27.
Zhou Z W, He Z M, Jiang S Y, et al. Analysis of spatio-temporal evolution characteristics of water bodies in Dongting Lake Basin based on multi-source time series images[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(10): 20-27.

[5] 王航,秦奋. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 测绘科学, 2018, 43(5): 23-32.
Wang H, Qin F. Summary of the research on water body extraction and application from remote sensing image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(5): 23-32.

[6] Gubran M, Ghrefat H, Zaidi F, et al. Integration of hydrochemical, GIS, and remote sensing data forassessment of shallow groundwater aquifers in Wadi Nisah, Central Saudi Arabia[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(5): 161-175.

[7] 毋琳,王宁,赵建辉,等. 河流径流雷达卫星遥感监测系统的设计与实现[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 433-442.
Wu L, Wang N, Zhao J H, et al. Design and lmplementation of river runoff monitoring system based on radar satellite remote sensing[J]. Journal of Henan University (Natural Science Edition), 2020, 50(4): 433-442.

[8] 王小娜,田金炎,李小娟,等. Google Earth Engine 云平台对遥感发展的改变[J]. 遥感学报, 2022, 26(2): 299-309.
Wang X N, Tian J Y, Li X J, et al. Benefits of Google Earth Engine in remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2): 299-309.

[9] 胡昊,邓莹,赵章红,等. 基于 GEE 平台的开封市地表水体遥感监测与分析[J]. 测绘地理信息, 2025, 50(2):79-82.
Hu H, Deng Y, Zhao Z H, et al. Remote sensing monitoring and analysis of surface water bodies in Kaifeng City based on Google Earth Engine[J]. Journal of Geomatics, 2025,50(2):79-82.

[10] 蒋宇翔,温彦平,赵国松,等. 基于 Sentinel-1 遥感数据的东洞庭湖水文特征动态监测[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2023, 46(4): 88-96.
Jiang Y X, Wen Y P, Zhao G S, et al. Monitoring hydrological characteristics of east Dongting Lake based on Sentinel-1 remote sensing data[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2023, 46(4): 88-96.

[11] 李辉,高学睿,谢治国,等. 陕西省黄土高原地表水体遥感监测与时空演变特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 19-27.
Li H, Gao X R, Xie Z G, et al. Remote sensing monitoring and analysis of spatiotemporal evolution characteristics of surface water bodies in the loess plateau of Shaanxi Province[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 19-27.

[12] 郭山川,杜培军,蒙亚平,等. 时序 Sentinel-1A 数据支持的长江中下游汛情动态监测[J]. 遥感学报, 2021, 25(10): 2127-2141.
Guo S C, Du P J, Meng Y P, et al. Dynamic monito-

ring on flooding situation in the middle and lower reaches of the Yangtze River region using Sentinel-1A time series[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(10): 2127-2141.

[13] 李晶,闫星光,闫萧萧,等. 基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1439-1450.
Li J, Yan X G, Yan X X, et al. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in the Yellow River Basin based on GEE cloud platform[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1439-1450.

[14] 陈炜,黄慧萍,田亦陈,等. 基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(9): 1382-1391.
Chen W, Huang H P, Tian Y C, et al. Monitoring and assessment of the eco-environment quality in the Sanjiangyuan region based on Google Earth Engine[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(9): 1382-1391.

[15] 彭妍菲,李忠勤,姚晓军,等. 基于多源遥感数据和 GEE 平台的博斯腾湖面积变化及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 1131-1153.
Peng Y F, Li Z Q, Yao X J, et al. Area change and cause analysis of Bosten Lake based on multi-source remote sensing data and GEE platform[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(6): 1131-1153.

[16] 王庆明,张越,窦鹏,等. 1985—2020 年京津冀平原水面面积演变特征及归因分析[J]. 水利学报, 2023, 54(4): 451-460.
Wang Q M, Zhang Y, Dou P, et al. Evolution characteristics and attribution analysis of water surface area in Beijing-Tianjin-Hebei plain from 1985 to 2020[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(4): 451-460.

[17] 王克英. 洞庭湖治理与开发[M]. 长沙: 湖南人民出版社, 1998: 33-36.

[18] 曹善浩,王志强,刘贤赵,等. 1956 年以来 9 个时期湖南省湿地动态研究[J]. 湿地科学, 2020, 18(1): 54-61.
Cao S H, Wang Z Q, Liu X Z, et al. Dynamics of wetlands in Hunan Province for 9 periods since 1956[J]. Wetland Science, 2020, 18(1): 54-61.

[19] 梁旻轩,谢正磊,毛德华,等. 1980 年以来 5 个时期洞庭湖区国际重要湿地景观动态研究[J]. 湿地科学, 2020, 18(1): 40-46.
Liang M X, Xie Z L, Mao D H, et al. Landscape dynamics of wetlands of international importance in Dongting Lake area for 5 periods since 1980[J]. Wetland Science, 2020, 18(1): 40-46.

[20] 程俊翔,徐力刚,姜加虎,等. 洞庭湖出口径流变化及对生态系统的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1225-1234.
Cheng J X, Xu L G, Jiang J H, et al. Changes in streamflow at the outlet of Dongting Lake and their impacts on ecosystems[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1225-1234.

[21] 熊建新,吴南飞,陈端吕,等. 洞庭湖区生态承载力响应的时空分异[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(12): 13-21.
Xiong J X, Wu N F, Chen D L, et al. Spatial-temporal differentiation ecological carrying capacity response in Dongting Lake region[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(12): 13-21.

[22] 中国水利百科全书第二版编辑委员会. 中国水利百科全书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[23] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等. 近 10 年来洞庭湖区水面面积变化遥感监测分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(3): 201-207.
Li J G, Li J R, Huang S F, et al. The remote sensing monitoring analysis of chinese Dongting Lake water area variations inlast 10 years using Terra/MODIS data time series[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(3): 201-207.

[24] 宋利娟,景海涛,徐嘉慧,等. 联合哨兵卫星系列雷达与光学影像的洞庭湖水域面积变化高时空分辨率监测[J]. 遥感学报, 2023, 27(11): 2516-2529.
Song L J, Jing H T, Xu J H, et al. High spatial and temporal resolution monitoring of water area changes of Dongting Lake by joint sentinel satellite series of radar and optical images[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(11): 2516-2529.

[25] 黄群,孙占东,赖锡军,等. 1950s 以来洞庭湖调蓄特征及变化[J]. 湖泊科学, 2016, 28(3): 676-681.
Huang Q, Sun Z D, Lai X J, et al. Changes of the flood regulation capacity at Dongting Lake since 1950s[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(3): 676-681.

[26] Yu Y W, Mei X F, Dai Z J, et al. Hydromorphological processes of Dongting Lake in China between 1951 and 2014[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 254-266.

[27] Dai M L, Wang L, Zhang M B, et al. Impact of the three gorges project operation on the water exchange

between Dongting Lake and the Yangtze River[J]. International Journal of Sediment Research, 2017, 32(4): 506-514.

[28] Du Y, Xue H P, Wu S, et al. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th century[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(4): 1248-1255.

[29] Zhang J H, Feng L J, Chen L, et al. Water compensation and its implication of the three gorges reservoir for the river-lake system in the middle Yangtze River, China[J]. Water, 2018, 10(8): 1011.

[30] 王红娟,姜加虎,黄群. 东洞庭湖湿地景观变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007(6): 732-737.
Wang H J, Jiang J H, Huang Q. A study on the change of wetland landscape pattern in east Dongting Lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007(6): 732-737.

[31] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[32] Chen R J, Chen X D, Ren Y. Automatic multi-temporal land cover mapping with medium spatial resolution using the model migration method[J]. Remote Sensing, 2025, 1(17): 37.

[33] Zhang X, Zhao T T, Xu H, et al. GLC_FCS30D: The first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series landsat imagery and the continuous change-detection method[J]. Earth System Science Data, 2024(16): 1353-1381.

[34] Meng S L, Pang Y, Huang C Q, et al. Improved forest cover mapping by harmonizing multiple land cover products over China[J]. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 1570-1597.

[35] Wang Z H, Shi X G, Du S T, et al. The 30m land cover dataset for capturing land cover changes in duced by ecological restoration from 1990 to 2022 on the Chinese Loess Plateau[J]. Scientific Data, 2025, 1(12): 252.

[36] Ding Q, Shao Z H, Huang X, et al. Time-series land cover mapping and urban expansion analysis using open street map data and remote sensing big data: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2022, 113: 103001.

[37] Xu X L, Li D, Liu H X, et al. Comparative validation and misclassification diagnosis of 30-meter land cover datasets in China[J]. Remote Sensing, 2024, 16(22): 4330.

[38] Mcfeeters S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.

[39] 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 K, Chang Y P, Guan J. Monitoring of water area changes based on the normalized difference water index[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2024, 43(2): 54-57.

[40] 贾诗超,薛东剑,李成绕,等. 基于 Sentinel-1 数据的水体信息提取方法研究[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 213-217.
Jia S C, Xue D J, Li C R, et al. Study on new method for water area information extraction based on Sentinel-1 data[J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 213-217.

[41] 李小雨,贾科利,魏慧敏,等. 基于随机森林算法的土壤含盐量预测[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1258-1267.
Li X Y, Jia K L, Wei, H M, et al. Prediction of soil salt content based on the random forest algorithm[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1258-1267.

[42] 张亮亮,张朝,曹娟,等. GEE 环境下的玉米低温冷害损失快速评估[J]. 遥感学报, 2020, 24(10): 1206-1220.
Zhang L L, Zhang C, Cao J, et al. Rapid assessment of maize chilling damage based on GEE[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(10): 1206-1220.

[43] 鲁西奇. “水利社会”的形成——以明清时期江汉平原的围垸为中心[J]. 中国经济史研究, 2013(2): 122-139.

[44] 聂芳容. 构建洞庭湖生态和经济新发展格局[J]. 湖南水利水电, 2021(2): 1-23.

[45] 钟小敏,帅红,李景保,等. 水利工程群对洞庭湖城陵矶特征水位的综合影响[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5): 72-80.
Zhong X M, Shuai H, Li J B, et al. Comprehensive influence of hydraulic projects on the water level characteristics of Chenglingji in Dongting Lake[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(5): 72-80.

(编　辑　亢小玉)