

1990–2021 年洞庭湖流域地表水面积时空变化趋势及驱动因素*

资锋¹, 陈博^{1,2}, 贺秋华^{2,3**}, 罗伟奇^{2,3}, 王勇^{1,4}, 尹向红^{2,3}, 杨若君^{2,3}, 许文浩¹

(1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室, 长沙 410004;

3. 湖南省自然资源事务中心, 长沙 410004;

4. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715;)

摘要: 洞庭湖流域的地表水资源在维护生态系统、保护生物多样性及调节区域气候方面具有重要作用, 同时也容易受到气候变化和人类活动的显著影响。尽管目前已有较多研究关注洞庭湖流域地表水面积的动态变化, 但多数研究成果缺乏长时间序列的全流域系统分析, 对驱动机制的解析也以定性描述为主, 空间分析往往局限于主湖区。为此, 本研究以全流域及子流域为对象, 旨在系统揭示洞庭湖流域地表水面积的时空演变规律, 定量阐明气候因子与人类活动对地表水动态的贡献, 并分析子流域地表水分布重心的迁移规律。基于多源遥感卫星数据与 JRC 全球地表水数据集产品, 综合运用 M-K 检验、Pettitt 突变检验、Pearson 相关分析及重心迁移模型, 本研究系统分析了 1990—2021 年洞庭湖流域地表水面积的时空变化特征及其主要驱动因素。结果表明: ①近 30 年来, 流域地表水面积总体呈增长趋势, 其中沅江水系增幅最为显著, 达 420.07%, 空间差异明显, 时间上呈现“快速扩张—波动缩减—恢复增长”三阶段特征; ②全流域地表水分布重心整体向西南方向迁移, 东西向位移幅度最为显著, 累计偏移 19.56 km, 各子流域重心迁移与区域水利工程建设、生态修复措施的空间布局高度相关, 反映了人类活动对地表水空间格局的重塑作用; ③降水是流域地表水面积增加的主要气候因子, 而水利工程建设、退耕还湖等人类工程与生态修复措施则显著改变了地表水的空间分布格局; ④气候变化对地表水面积变化的贡献率约为 40%~55%, 而水利工程、退耕还湖等人类调控与生态修复措施的贡献率达 45%~60%, 成为主导驱动力。本研究有助于深入理解洞庭湖流域地表水资源的长期演变规律, 为制定科学合理的生态系统保护与修复策略提供重要参考。

关键词: 洞庭湖流域; 地表水; 时空变化; 气候变化; 人类活动

Spatiotemporal Variation Trends and Driving Factors of Surface Water Area in Lake Dongting Basin, 1990–2021

Zi Feng¹, Chen Bo^{1,2}, He Qiu Hua^{2,3**}, Luo Wei Qi^{2,3}, Wang Yong^{1,4}, Yin Xiang Hong^{2,3}, Yang Ruo Jun^{2,3} & Xu Wen Hao¹

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, P.R. China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Ecological Environment in Lake Dongting Area. Changsha 410004, P.R. China;

*2025-04-06 收稿; 2025-10-18 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (41002022)、湖南省教育厅科学研究重点项目 (24A0326)、湖南省研究生科研创新项目

(LXBZZ2024293)、湖南省大学生创新训练计划项目 (湘教通 191-3491) 和洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室开放课题 (DTH Key Lab.2024-08) 联合资助。

*通信作者; E-mail: hn23559@126.com

3. Hunan Center of Natural Resources Affairs, Changsha 410004, P.R.China;

4. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, P.R.China)

Abstract: Surface water resources in the Lake Dongting Basin play a vital role in sustaining ecosystems, protecting biodiversity, and regulating climate, yet they remain highly vulnerable to climate change and human activities. Although numerous studies have examined surface water area dynamics in the basin, most lack long-term, basin-wide analyses, rely largely on qualitative descriptions of driving mechanisms, and confine spatial assessments to the main lake area. To address these gaps, this study systematically investigates the spatiotemporal evolution of surface water area across the entire Lake Dongting Basin and its sub-basins, quantifies the contributions of climatic factors and human activities to surface water dynamics, and analyzes migration patterns of the surface water distribution centroid in sub-basins. Using multi-source remote sensing data and the JRC Global Surface Water Dataset, and applying the Mann–Kendall test, Pettitt test, Pearson correlation analysis, and centroid analysis models, this study delineates the spatiotemporal variation patterns and primary drivers of surface water area in the Lake Dongting Basin from 1990 to 2021. The results indicate that: ① over the past 30 years, the surface water area of the basin has exhibited an overall increasing trend, most notably in the Yuanjiang River system, where it expanded by 420.07%, with marked spatial heterogeneity and a three-stage temporal pattern characterized by “rapid expansion–fluctuating reduction–recovery growth”; ② the centroid of surface water distribution across the basin has shifted southwestward, with the predominant fluctuation occurring along the east–west direction, amounting to a displacement of 19.56 km; centroid migration in sub-basins closely correlates with the spatial distribution of water conservancy projects and ecological restoration measures, reflecting the reshaping influence of human activities on surface water spatial patterns; ③ precipitation is the principal climatic factor driving the increase in surface water area, while human engineering interventions and ecological restoration measures—such as water conservancy construction and “returning farmland to lakes”—have substantially altered the spatial distribution pattern of surface water in the basin; ④ climate change accounts for approximately 40%–55% of the variation in surface water area, whereas human engineering regulation and ecological restoration measures contribute 45%–60%, representing the dominant driver and significantly modifying the spatial configuration of surface water. This study enhances the understanding of long-term surface water resource variations in the Lake Dongting Basin and provides a scientific basis for formulating effective ecosystem protection and restoration strategies.

Keywords: Lake Dongting Basin; Surface water; Spatial and temporal change; Climate change; Human activity

水资源作为维系生态安全与人类社会发展的核心要素,其时空分布格局的动态演变深刻反映着气候系统与人类活动的交互作用^[1,2]。地表水体作为水资源的主要赋存形式,不仅是生态水文过程的关键载体,其面积的长期变化更是量化气候变化与人类活动对水资源系统影响的核心指标^[3,4]。根据政府间气候变化专业委员会(IPCC)公布的第六次全球气候评估报告显示,全球增温背景下极端降水事件频发,流域水循环对气候强迫的响应显著加剧,导致水资源时空再分配的不确定性上升,进而对区域水资源安全构成威胁^[5-7]。

洞庭湖流域位于长江中游荆江南岸,跨湖南、湖北两省及流经广西、江西、贵州、重庆等省市部分地区,依托“北承长江四口、南纳湘资沅澧四水”的复杂水系,形成了独特的江湖联动调蓄系统^[8],不仅是维系长江中游生态安全的关键节点,更是国家重要的商品粮基地^[9,10]。近年来,受全球气候变暖与高强度人类活动影响,湖区极端洪涝干旱事件频率上升,水域面积呈现显著的季节性萎缩与年际波动,导致防洪能力下降、生态湿地退化、农业灌溉水源短缺等连锁问题^[12]。已有研究表明,三峡工程运行等水利工程建设对地表水变化的影响率达 38%-52%^[13],但气候与人类活动的交互作用仍不明确。通过运用遥感影像研究 1990-2021 年洞庭湖流域地表水面积的长期变化趋势,可量化不同驱动因子的影响度,进而为分析自然与人工对水资源的调控作用提供科学依据,最终实现流域水土资源的可持续利用^[14-16]。

20 世纪 90 年代前后降水呈现先增后枯的趋势,且湖南四水入洞庭湖汛期径流量年际分配不均并逐渐减少。人类活动影响在 90 年代后加剧,随着湖区工农业发展、人口增加,水污染问题凸显,1990-2002 年

湖体水质以II-III类为主, 2003年后劣V类水质出现, 且II-III类水质占比显著下降直至消失, 从1990年开始研究可有效追踪生态环境变化对地表水的影响。已有研究在洞庭湖地表水领域取得三方面进展: ①水文监测方面, 传统站点已建立主湖区水位-面积高精度关系模型, 并揭示1990-2010年枯水期水位年均下降0.12m的趋势; ②遥感应用方面, 基于Landsat/Sentinel遥感数据的主湖区监测显示, 1984-2020年夏季水域面积波动系数达15.6%, 西洞庭湖萎缩23%; ③驱动机制方面, 单因子分析表明降水贡献度约60%、围垦导致面积减少11.5%^[17-18]。

然而, 现有研究仍存在显著局限: ①传统水文站点监测方法虽能获取局部高精度数据, 但受限于站点空间分布稀疏与数据连续性问题, 难以捕捉流域尺度地表水的长期动态演变特征^[19]; ②遥感监测研究多聚焦于洞庭湖主湖区范围, 对湘资沅澧等主要子流域及全流域地表水的空间异质性分析不足, 缺乏多尺度联动视角^[20-22]; ③驱动机制研究目前以定性分析为主, 但对气候因子与人类活动的定量解析不足, 尚未建立多因子归因的科学框架。针对上述研究缺口, 本研究基于长时间序列卫星遥感数据与水文模型模拟结果, 首先利用GEE平台获取1990-2021年JRC全球地表水数据集, 结合GLDAS气象模型构建连续32年的地表水面积变化数据集; 然后通过M-K检验、Pettitt突变点检测及重心模型, 解析全流域、子流域及主湖区的面积变化趋势, 最后基于Pearson相关与残差分析量化气候贡献, 结合人类工程活动, 识别因子作用的时空分异。旨在实现以下科学目标: 一是揭示1990-2021年洞庭湖流域地表水面积在全流域-子流域-主湖区多尺度下的时空演变规律, 解析其长期变化的趋势性与周期性特征; 二是量化气候因素与人类活动对流域地表水动态的相对贡献, 识别不同驱动因子在时间尺度和空间单元上的作用差异。

1 材料与方法

1.1 研究区域

洞庭湖流域位于北纬24°38'~30°26', 东经107°16'~114°17'之间, 流域面积达26.3万km², 约占长江流域面积的14.6%, 属于亚热带季风气候^[16]。在地形地貌方面, 洞庭湖流域东、南、西三面环山, 北面为长江中游江汉平原, 地势上呈布袋口形状, 独特的地形使得流域特别是在洞庭湖湖区形成了发达的水系网, 且由北部洞庭湖向南呈扇形辐射状分布^[23]。流域内水系构成复杂, 除南部与西部的湘江、资水、沅江、澧水四条支流外, 北部通过松滋口、太平口、藕池口与长江干流连通, 形成“四口(含已基本断流的调弦口)分长江、四水汇洞庭”的独特江湖格局。其中, “三口”是长江洪水向洞庭湖分流的重要通道, 其分流量约占洞庭湖来水总量的30%-40%, 与“四水”来水共同决定了洞庭湖的水位涨落、水域面积变化及调蓄功能。所有入湖水量经洞庭湖调蓄后, 最终通过城陵矶注入长江^[24]。基于研究目的本文将洞庭湖流域分为洞庭湖水系、湘江水系、资水水系、沅江水系、澧水水系(图1)。

1.2 研究数据

本文研究数据主要包含3个部分: JRC基于遥感数据的全球地表水数据集产品、GLDAS水文模型数据与其它辅助数据。

(1) 全球地表水数据集。选用GEE(Google Earth Engine)平台中的JRC全球水面分布数据集(JRC Yearly Water Classification History, v1.4)(<https://global-surface-water.appspot.com/>), 该数据集是使用1984年3月16日至2021年12月31日期间获取的Landsat5、7和8的4716475个影像提取而来^[25]。研究中提取了洞庭湖流域1990-2021年永久性和季节性水面分布数据。本研究将永久性水面与季节性水面整合为地表水面分布数据。这一处理方式目的是便于研究流域地表水资源的整体动态, 其中永久性水面反映了流域水资源的基础存量, 而季节性水面则体现了水资源对气候波动和人类活动的响应, 二者的叠加分析能更完整地揭示洞庭湖流域地表水资源的时空演变规律。由于1991年Landsat5传感器(SLC)故障导致影像条带噪声(云量>70%, 有效水面提取像素<30%); 1997年长江流域特大洪水(6-9月云量>85%), 卫星影像受云层遮蔽, 无法准确提取水面信息。通过计算1990-1998年数据的标准差和变异系数, 发现使用邻近年份均值替代后, 数据序列的波动幅度与整体趋势保持一致, 未显著改变原始数据的统计特征。对比原始数据与处理后数据的M-K趋势检验结果, Kendall'stau值和显著性水平无明显差异, 说明该处理方法未对长期趋势分析产生实质性影响。所以对数据异常年份(1991与1997)采用邻近年份均值替代处理, 用于研

究流域地表水面积近 30 年的长期变化规律。

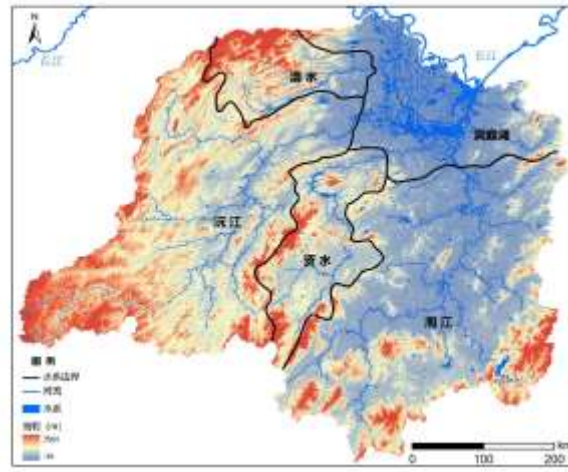


图 1 洞庭湖流域概况

Fig.1 Overview of the Lake Dongting Basin

(2) GLDAS 水文模型数据。选用美国航空航天局 (NASA) 发布的 GLDAS_NOAH025_M 2.0 模型 (1948-2015 年), 选用时间段为 1990-1999 年, 以及 GLDAS_NOAH025_M2.1 模型 (2000-2021 年), 选用时间段为 2000-2021 年, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为 1 个月 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)。分别从中提取了研究区 32 年共 384 个月的总降水、气温以及蒸发量数据, 其中总降水由降雨与降雪两部分组成^[26]。

(3) 其它辅助数据。研究中使用的其它辅助数据包括亚洲 12 级流域盆地分布、洞庭湖流域边界、河流、湖泊分布等数据集。其中, 亚洲 12 级流域盆地分布数据来源于美国地质调查局官网 (<https://www.usgs.gov/>), 其它辅助数据均来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>)。

1.3 研究方法

本研究利用 GEE、ArcGIS 等平台 and 工具获取研究区的地表水分布及气象要素数据集, 通过重心分析模型、M-K 趋势检验、Pettitt 突变点检验以及 Pearson 相关性分析等方法, 探讨了近 30 年来洞庭湖流域地表水面积的时空变化规律及其驱动因子。

(1) Mann-Kendall 趋势检验。Mann-Kendall (简称“M-K”) 检验方法^[27]是一种非参数检验方法, 由曼 (H.B.Mann) 和肯德尔 (M.G.Kendall) 提出, 该方法作为一种非参数统计检验方法被广泛应用在不同尺度的变量趋势检测中。在本文中用于量化 1990-2021 年洞庭湖流域及各水系地表水面积的长期变化趋势。

(2) Pettitt 突变点检验。Pettitt 检测^[28]是基于 M-K 检验方法基础上的一种改良算法, 作为能检测时间序列中单个未知突变点的常用工具, 它能够识别时间序列数据发生突变的时间点, 也是常见的非参数检验方法之一。本文中用该方法确定地表水面积变化的关键转折节点。

(3) 双变量 Pearson 相关性检验。协方差是皮尔逊相关系数^[29] (Pearson Correlation Coefficient) 计算的先决条件, 它是表示两个变量 (x,y) 之间相互关系的数值特征, 同时需要参与的变量数 $n > 2$ 。本文中用于分析降水、蒸发等气候因子与地表水面积的相关性。

(4) 重心分析模型。本文从水系单元的角度分析了流域内 1990-2021 年地表水面积的时空变化特征, 并采用重心分析模型^[30]来反映流域内地表水分布重心近 30 年的空间变化。本文中用于追踪 1990-2021 年洞庭湖流域地表水空间分布重心的迁移轨迹及其驱动因素。

(5) 双累积曲线法与贡献率计算。双累积曲线可用于检验两个参数间关系一致性及其变化。常被用于水文气象要素一致性的检验、缺值的插补或资料校正, 以及趋势性变化及其强度的分析^[31]。本文中用于

分析自然与人类活动对地表水面积变化的贡献。

2 结果与分析

2.1 洞庭湖水系地表水面积时序变化趋势

洞庭湖流域地表水面积呈现显著增长趋势。1990 年流域全域地表水面积为 4648.09 km²，到 2021 年上升至 7004.67 km²，增幅达 50.70%（表 1，图 2）。由图 2 可见，1990—2021 年间，洞庭湖流域地表水面积在波动中总体上升，其中洞庭湖水系面积约占全流域的 65%。四水水系面积均表现为显著增长，沅江由 175.41 km² 增长至 912.23 km²，增幅达 420.07%，增速最快；澧水水系由 91.83 km² 增长至 160.76 km²，增幅为 175.07%；湘江由 990.88 km² 增长至 1483.22 km²，增幅为 49.69%；资水由 277.52 km² 增长至 325.09 km²，增幅为 17.14%，各水系增幅依次递减（图 2）。洞庭湖水系的演变呈现明显的阶段性特征：① 1990—1996 年，全域地表水面积呈波动增长趋势，由 4648.09 km² 增至 6941.02 km²，年均增长 327.56 km²，较 1990 年增长 49.33%；② 1997—2014 年，全域面积转为波动缩减，由 6626.42 km² 减至 5989.96 km²，年均减少 35.36 km²，较 1997 年减少 9.60%；③ 2015—2021 年，面积再次转为增长，由 6128.23 km² 增至 7004.67 km²，年均增长 125.21 km²，较 2015 年增长 20.43%（表 1）。

表 1 1990—2021 年洞庭湖流域及各水系地表水面积 M-K 及 Pettitt 检验结果

Tab.1 M-K and Pettitt test results for surface water area in LAKE DONGTING BASIN and each water system, 1990-2021

检验方法	水系单元	Kendall's tau	P-value (双侧检验)	Alpha	Hypothesis H ₀
M-K 趋势检验	洞庭湖水系	0.141	0.263	0.05	接受假设
	湘江水系	0.500	<0.0001	0.05	拒绝假设
	资水水系	0.282	0.024	0.05	拒绝假设
	沅江水系	0.681	<0.0001	0.05	拒绝假设
	澧水水系	0.774	<0.0001	0.05	拒绝假设
	洞庭湖流域	0.310	0.013	0.05	拒绝假设
Pettitt 突变点检验	水系单元	突变年份	P-value (双侧检验)	Alpha	Hypothesis H ₀
	洞庭湖水系	1996	0.035	0.05	拒绝假设
	湘江水系	2012	0.001	0.05	拒绝假设
	资水水系	2012	0.037	0.05	拒绝假设
	沅江水系	2006	0.0002	0.05	拒绝假设
	澧水水系	2007	<0.0001	0.05	拒绝假设
洞庭湖流域	1996	0.026	0.05	拒绝假设	

注：M-K 检验：H₀（序列数据无变化趋势）；Pettitt 检验：H₀（序列数据是同质化的）

尽管 M-K 检验未通过显著性水平，但 Pettitt 检验显示，洞庭湖流域全域及相关区域均在 1996 年发生突变。突变后（1996-2014 年），区域地表水面积呈波动缩减态势，这一变化受多重驱动因素共同影响。1996-2014 年洞庭湖流域地表水面积呈波动缩减态势，年均减少 35.36km²，这一阶段主要受三峡工程蓄水影响。从工程影响来看，三峡工程于 1994 年开工建设，1997 年大江截流，2003 年进入围堰挡水发电期，工程建设及蓄水运行显著改变了长江与洞庭湖的水量交换关系。长江水利委员会监测数据显示，2003-2014 年长江入湖水量较 1990 年代年均减少 18.7%，导致洞庭湖水位平均下降 0.8-1.2m，直接造成水域面积缩减。而同期的生态修复工程虽有进展，如 1998 年后实施的“退田还湖”工程使西洞庭湖新增水域，但据洞庭湖生态环境监测中心统计，其新增水量约 8 亿 m³/a，而三峡工程导致水量损失约 45 亿 m³/a，仅能弥补 17.8%，远不足以抵消工程耗水效应。此外，工程蓄水还引发长江干流河道冲刷下切，导致江湖水位差减小，进一步削弱了长江对洞庭湖的补给能力。多重因素共同作用下，形成“人工调控耗水优先于生态修复增水”的局面，导致全域面积持续缩减，直至 2014 年后政策增水量才逐步抵消工程耗水影响。

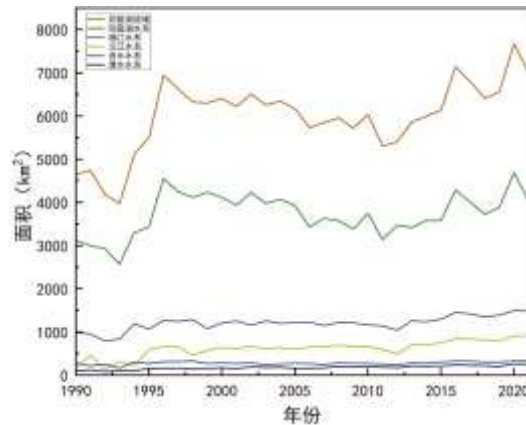


图 2 1990-2021 年洞庭湖流域及各水系地表水面积变化

Fig.2 Changes in surface water area of Lake Dongting Basin and its various water systems, 1990-2021

2015 年成为第二个关键拐点，主要受政策与工程双重驱动。政策层面，国家大力推进生态文明建设，洞庭湖流域“4350 工程”全面实施，旨在将洞庭湖水域面积恢复至 4350km² 的生态目标。一系列退耕还湖、湿地修复项目密集落地，2015-2021 年期间，洞庭湖区新增水域 455.50km²，有效抵消了前期因水利工程建设造成的部分水域面积减少。工程建设方面，在枯水期时，通过水库调度在干旱季节向洞庭湖补水，直接增加枯水期的水量，扩大该时期的水域覆盖范围。这一措施主要解决季节性缺水问题，形成的水域面积会随季节变化。在洪水期，水库在汛期通过拦蓄洪水、错峰下泄，避免洞庭湖水位短期内急剧上涨，减少洪水泛滥导致的临时淹没区域。该措施本质上是调节水位波动范围，防止季节性洪水对周边区域的过度侵蚀。枯水期补水、洪水期错峰调度等措施，不仅稳定了流域水资源供给，也使得四水水系对洞庭湖的补给更为稳定，推动水域面积整体回升。此外，随着流域内生态保护意识增强，污染治理力度加大，治理后的水质使得水体蒸发后能更有效地参与水循环，重新以降水形式补充到湿地水域中，同时避免了因污染渗透造成的地下水污染和土壤板结，维持了土壤的正常渗透和保水能力，减少水资源的无效流失。水环境质量改善间接促进了湿地生态系统的恢复，为水域面积增长提供了有利条件。

2.2 洞庭湖流域地表水体空间分布重心变化

洞庭湖流域水面重心 1990-2020 年从 112.063° E,28.128° N 向西南方向移动 21.44km 至 111.877° E,28.075° N，其中东西向位移 19.56km，南北向位移 5.86km。该移动轨迹显示流域西部水域扩张显著，与沅江、澧水水系的水库建设及退耕还湖区域的空间分布一致（表 2）。

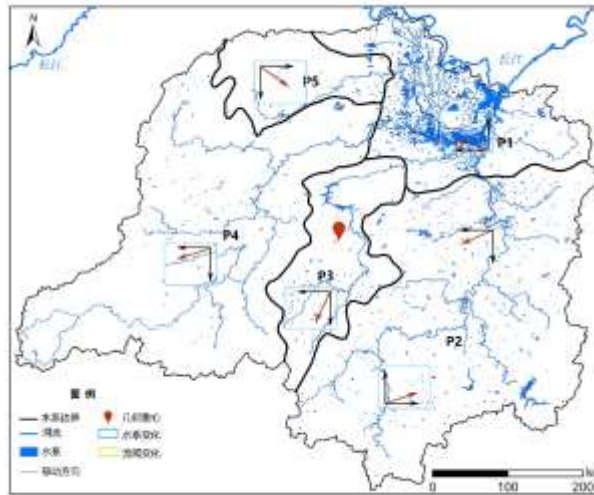
从各水系水面分布重心的移动方向来看，洞庭湖区（P1）：重心西移 12.31km，西部退耕还湖新增水域集中于常德、益阳西部，反映生态修复对湖区西部的空间优化。湘江水系（P2）：重心东移，洮水水库（东部）建设主导东部支流扩展，与东部平缓地形下的工程布局相匹配。资水水系（P3）：重心西南移动 33.72km，托口电站（南部）蓄水推动南部水域增长，体现南部丘陵区工程对水系的空間重塑。重心西北移动 44.85km，三板溪水库（西部）蓄水驱动上游水域扩展，体现西部高海拔区水利工程的空间调控效应。重心东南移动 10.225km，反映东部平原区水域的局部扩张（附表 I，图 3）。

从驱动机制与空间响应综合分析，①从地形-工程关系来看，西部地势落差大，水库，如三板溪、皂市蓄水后水域扩展显著，而东部地势平缓，工程影响较弱，形成“西强东弱”的工程调控格局。从气候-空间关系来看，西部降水更丰沛、蒸发更低，叠加工程蓄水，促成西部水域持续增长，而东部受降水波动影响，水域增长受限。③从人类工程活动来看，退耕还湖与水库建设共同推动“西扩南移”，既提升湖区调蓄能力，又通过四水水库群优化了流域水资源的空间分配。

2.3 气候变化和人类活动对水体面积影响的定量区分

依据前文关于研究区内各个流域 Pettitt 突变点检验的分析，将各个研究区的研究期划分为基准期和

人类活动影响期。各研究区多元回归模型的具体参数与贡献度统计详见表 2。统计结果显示：所有研究区的模型模拟值与实测值的皮尔逊相关系数均高于 0.90，且通过 $P < 0.01$ 的显著性检验，表明基于累积变量构建的多元回归模型对水体面积变化具有显著的拟合效果。除资水水系外，其余区域人类活动对水体面积变化的贡献度均高于自然因素，表明研究期内人类活动为洞庭湖流域及多数支流水体面积变化的主导驱动力。资水水系中，自然因素贡献略高于人类活动，反映该区域水体面积变化更受气候要素的自然调控。通过自然情景模拟与实际观测值的残差分析，分离出气候变化与人类活动对水体面积变化的贡献份额。该归因方法基于“自然趋势延续性”假设，通过基准期建立的响应关系外推人类活动期的自然贡献量，进而通过差值法实现贡献率的定量分解。



P1 (洞庭湖水系); P2 (湘江水系); P3 (资水水系); P4 (沅江水系); P5 (澧水水系)

图 3 1990-2020 年洞庭湖流域及其各水系水面分布重心的空间移动

Fig.3 Spatial shifts in the gravity center of distribution of water surfaces in Lake Dongting Basin, 1990-2020

表 2 洞庭湖流域及其各水系水体面积与气温、降水和蒸发度的多元回归模型

Tab.2 Multiple regression models of water area in Lake Dongting Basin and its river systems with temperature, precipitation and evaporation

区域	基准期	多元回归公式	拟合优度	自然因素影响	人类活动影响
洞庭湖流域	1990-1996	$\Sigma A = -4777.17 + 3.56 \Sigma E + 98.755 \Sigma T + 1.36 \Sigma P$	0.999	46.31%	53.69%
洞庭湖水系	1990-1996	$\Sigma A = -210.51 + 11.32 \Sigma E - 286.74 \Sigma T + 0.16 \Sigma P$	0.999	43.27%	56.73%
湘江水系	1990-2012	$\Sigma A = -608.27 + 1.52 \Sigma E + 8.77 \Sigma T - 0.03 \Sigma P$	0.997	45.81%	54.19%
资水水系	1990-2012	$\Sigma A = -104.42 - 0.10 \Sigma E + 23.52 \Sigma T - 0.03 \Sigma P$	0.997	54.88%	45.12%
沅江水系	1990-2006	$\Sigma A = -688.41 + 2.95 \Sigma E - 48.39 \Sigma T - 0.49 \Sigma P$	0.996	43.78%	56.22%
澧水水系	1990-2007	$\Sigma A = -125.41 + 0.57 \Sigma E - 10.18 \Sigma T - 0.05 \Sigma P$	0.997	44.19%	55.81%

注: E 为蒸发量 (mm); T 为气温 (°C); P 为降水量 (mm); Σ 为逐年累积符号

2.4 气候变化特征与地表面积的相关性

从表 3 和图 4 中可以看出洞庭湖流域的多年平均降水量、蒸发量与气温分别为 1391.59mm、721.03mm 与 16.54°C，表明该地区降水丰富且蒸发量较低，为形成地表径流提供了有利条件。定量研究结果显示，气候变化对洞庭湖流域地表面积变化的贡献度大致为 40%-55% (表 3)。从时间变化的角度来看，尽管由于个别年份的气温异常，年平均气温的增长曲线波动幅度较大，但在 1990-2021 年期间，气温等气象因子基本未表现出明显的年际变化趋势。洞庭湖流域的年降水量与年蒸发量数据在近 30 年来则呈现出较为

明显的上升趋势，这表明近 30 年来气候要素的变化在一定程度上促进了洞庭湖流域地表水资源的增加。

表 3 1990-2021 年洞庭湖流域各气象要素 M-K 检验

Tab.3 M-K test for various meteorological elements in Lake Dongting Basin, 1990-2021

检验方法	气象要素	Kendall's tau	P-value (双侧检验)	Alpha	Hypothesis H ₀
M-K 趋势检验	年降水量	0.397	0.506	0.05	拒绝假设
	年蒸发量	0.532	<0.0001	0.05	拒绝假设
	年平均气温	0.165	0.189	0.05	接受假设

注：M-K 检验：H₀（序列数据无变化趋势）

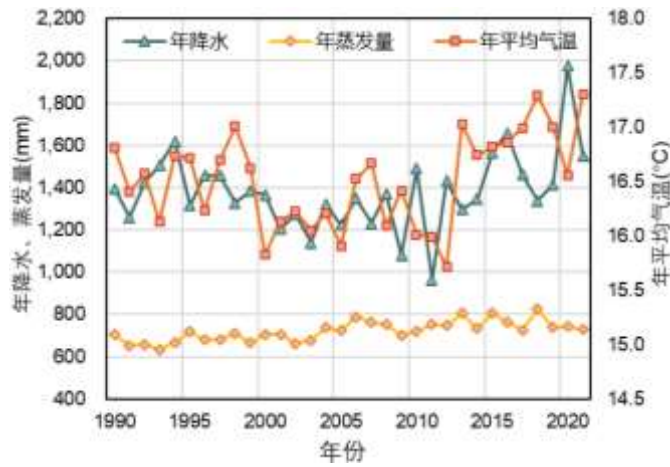


图 4 1990-2021 年洞庭湖流域各气象要素变化

Fig.4 Changes in meteorological elements in Lake Dongting Basin, 1990-2021

表 4 洞庭湖流域各水系水体面积与各气候要素的 Pearson 相关性检验

Tabl.4 Pearson's correlation test between water body area and various climatic factors for each water system in Lake Dongting Basin

气象要素	湘江水系	资水水系	沅江水系	澧水水系	洞庭湖水系
年降水量	0.270	0.406*	0.169	0.272	0.378*
年蒸发量	0.520**	0.342	0.561**	0.609**	0.137
年平均气温	0.365*	0.527**	0.184	0.191	0.128

注：*表示在 0.05 置信度水平（双侧）显著相关，**表示在 0.01 置信度水平（双侧）显著相关；样本数为 31。

2.5 人类活动影响下的地表水面积空间变化特征

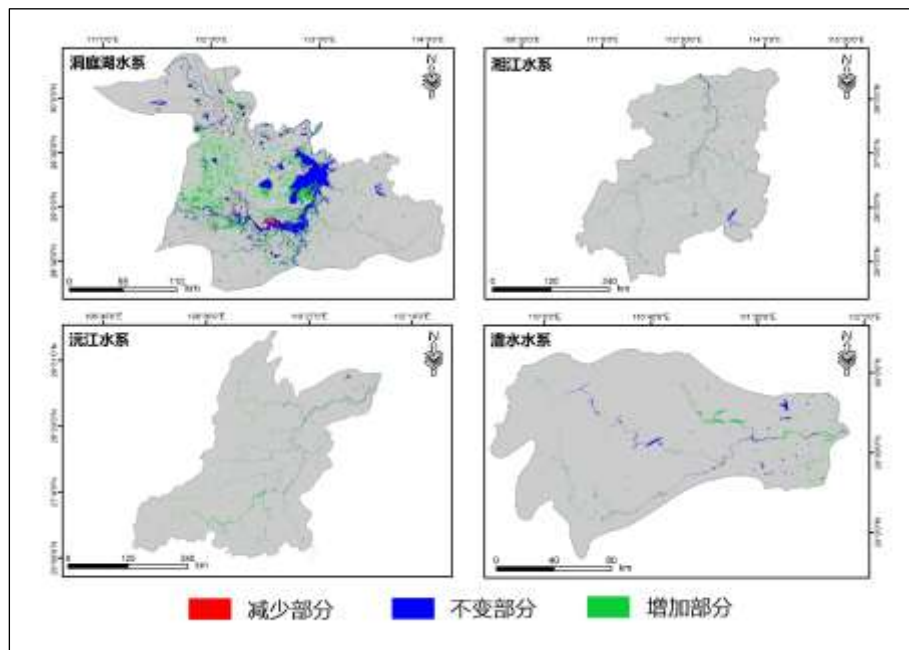
研究结果显示，人类活动对洞庭湖流域地表水面积变化的贡献度大致为 45%-60%（表 3）。在全球气候变暖的大背景下，强烈的人类活动能够极大地影响甚至改变流域地表水的时空格局，例如水利工程建设与运行、水资源政策的制定与执行等^[33,34]。2021 年洞庭湖流域地表水面积与 1990 年相比的增减情况如下（表 6，图 5）：增加、减少及不变部分分别对应面积扩张、缩减及未变区域。从表 6 和图 5 可知，近 30 年来湖区新增水域 1623.21km²，其中西部退耕还湖湖泊群（A 区）贡献 823km²，直接推动湖区重心西移 12.31km，占总位移 78%。A 区的恢复使沅、澧入湖口水域扩展，2021 年沅、澧入湖水量较 1990 年增加 18%，缓解了三峡蓄水导致的东部三口分流量下降，实现“西水东调”的江湖水量均衡。这一过程通过“生态修复-水量调节-空间重心迁移”的链式反应，重塑了湖区的水文地理格局（表 5）。①湘江水系：新增

691.40km²，占湘江净增长 104%，推动重心东移 0.078° E，占总位移 82%。洮水水库在东部丘陵区形成人工水面，新增灌溉面积 217km²，占 B 区新增 31.4%，优化了农业水资源的空间分配。②沅江水系：新增 610.24km²，占沅江净增长 101.5%，重心西北移动 44.85km，占总位移 92%。高海拔水库形成“水库-湿地-河流”生态链，新增湿地 432km²，占 C、D 区新增 70.8%，为黑鹳等候鸟提供栖息地，体现工程建设与生态保护的空间协同。③澧水水系：新增 121.76km²，占澧水净增长 105.1%，重心东南移动 10.225km，占总位移 89%。中游水库提升了平原区水资源利用效率，枯水期补水使澧水下游水面面积稳定，保障了农业灌溉与生态基流。

表 5 相比较于 1990 年，2021 年洞庭湖流域各水系地表水面积的减少、不变与增加部分

Tabl.5 Compared to 1990, the changes in surface water area of each water system in the Dongting Lake Basin in 2021 are categorized as decreased, unchanged, or increased

区域	减少部分(km ²)	不变部分(km ²)	增加部分(km ²)
洞庭湖水系	167.42	2394.25	1623.21
湘江水系	36.51	789.62	691.40
沅江水系	10.43	300.63	610.24
澧水水系	5.91	130.56	121.76



A (退耕还湖湖泊群); B (洮水水库); C (托口电站水库); D (三板溪水库) E (皂市水库); F (群英水库)

图 5 相比较于 1990 年，2021 年洞庭湖流域各水系地表水在空间分布上的变化

Fig.5 Compared with 1990, changes in the spatial distribution of surface water in each water system of Lake Dongting Basin in 2021

3 讨论

3.1 气候因素的影响

气象要素与水面积的低相关性主要源于水利工程的水文调节(表 4)。以沅江水系为例，托口电站(图 5 中 C 区)的季节节特性导致水面面积变化滞后于降水 3-6 个月。该电站的季节节水库在夏季降水丰沛期拦截储存径流量，使降水的增水效应未能即时转化为水面扩张，而是在枯水期水库下泄时才显现，导致两

者的同期相关性因时间错位而减弱。湘江洮水水库（图 5 中 B 区）的年调节特性使水面面积变化对降水的响应滞后 6 个月。水库通过主汛期时预留库容，把汛期降水储存至枯水期释放，使得降水与水面面积的同期相关系数仅为 0.270，而滞后 6 个月的相关性提升至 0.387，表明工程调控导致降水对水面面积的影响在时间序列上产生延迟。就洞庭湖水系而言，年降水量与洞庭湖水系水面面积通过了 Pearson 相关性检验，二者表现出显著的正相关性，而年蒸发量和年平均气温与水面面积的相关性未通过检验，这表明降水量是引起洞庭湖流域水体面积变化的主要气候因素。这一差异源于流域地形与人工调控的交互作用：上游丘陵区水库密集，人工蓄水显著改变自然水文过程，导致降水的直接贡献被工程调控稀释。同时，人工水面的高蒸发特性强化了蒸发与水面面积的正相关，形成“降水-蒸发-工程”的交互作用，而非单一降水驱动（表 4）。沅江水系上游为山区，水库密度低，自然降水的直接驱动更强；洞庭湖区作为调蓄中心，承接四水与长江径流，降水的累积效应主导面积变化，人工调控进一步放大降水的生态效应。此外，流域内年蒸发量与各水系地表水面积呈现出显著的正相关关系，可能的原因在于地表水面积的增加提供了更多的易蒸发下垫面^[32]。

湘江的“弱降水-强蒸发”相关，说明人工干预对气候-水文关系的重塑作用——工程调控不仅改变水量分配，还通过改变下垫面影响蒸发，导致气候因子的贡献格局重组。这与沅江、湖区形成鲜明对比，体现子流域尺度的驱动因素差异。年平均气温与各水系水面面积之间并未表现出明显的负相关关系，表明降水量的增加已有效抵消了气温上升对地表水面积缩减的影响，并且促进了蒸发量的增加。因此，进一步确认降水是引起洞庭湖流域近 30 年来地表水面积年际变化的主要气候因素。

3.2 人类活动的影响

通过分析各水系地表水在空间分布上的变化，水面面积增量最大的洞庭湖水系主要源于近 30 年来人工退耕还湖湖泊群（A）的增加。这些湖泊群主要分布在水系的西部和北部，导致该水系水域分布重心在 1990-2021 年期间向西北方向转移。该湖泊群包括湖南省常德市的白芷湖、冲天湖、柳叶湖和毛利湖等湖泊。这一变化与当地政府的水资源与湿地生态保护政策密切相关。例如，朱镕基总理在考察湖南时所提出的恢复洞庭湖水域与湿地面积的“4350 工程”，进一步加强了洞庭湖周边区域退耕还湖工作的实施，建立了洞庭湖国家自然保护区^[35]，并由此使得当地政府出台了一系列保护与恢复湖区湿地的政策，如《国家湿地保护行动计划》与《国家湿地保护规划(2002-2030)》等^[36,37]。

在水域面积增速最快的沅江水系，水面面积的增加主要由托口电站水库（C）和三板溪水库（D）的建设所引起，这导致该水系水面分布重心向西南方向移动了 45.80km。与此类似，湘江和澧水水系的水面面积增速也相对较快，分别源于位于湖南省茶陵县的洮水水库（B）、常德市石门县的皂市水库（E）和临澧县的群英水库（F）的建设，并引起各自水系水面分布重心的转移（图 5）。

地表水水面面积的变化与土地覆盖变化、人口增长与城市工业化进程密切相关^[38-40]。基于 1990-2021 年洞庭湖流域土地利用数据，来自 GEE 平台的 ESACCI-LC 数据集，空间分辨率 100m，以及人口统计数据源自国家统计局，对人类活动影响水域面积的情况进行定量解析。土地覆盖变化方面，近 30 年洞庭湖流域水田与林地面积缩减显著，其中林地向湖泊的转化最为突出。1990-2021 年林地面积减少 3215km²，12.3%约 395km² 转化为湖泊，主要分布于洞庭湖区西部退耕还湖区域，像常德市柳叶湖周边；同期水田面积减少 2187km²，8.7%约 190km² 被建设用地侵占，集中于长沙市、岳阳市等城市化热点区域。相比之下，人工湿地包含水库、池塘面积增加 1323km²，但仅能补偿自然湿地损失量 585km² 的 226%，印证人工湿地无法完全替代自然湿地生态功能的结论。人口增长与城市工业化对水域面积的影响呈现双向特征。一方面，城市化进程致使湿地面积显著减少：1990-2021 年洞庭湖流域人口密度从 185 人/km² 增至 247 人/km²，建设用地面积扩张 1178km²，年均增速 1.2%，直接侵占 13.6%约 160km² 的湿地资源，主要用于住宅建设与交通基础设施，例如京港澳高速、长株潭城际铁路沿线。另一方面，城市景观建设与水利工程推动水域面积局部增加：城市人工湖如长沙梅溪湖与农业灌溉水库如洮水水库新增水面 783km²，但此类人工水体的生态价值仅为自然湿地的 38%-45%，以生物多样性指数衡量^[41]。然而，退耕还湖的政策一直在弥补湿地等水生生态系统的损失^[42]，这是应该值得我们去积极贯彻并认真对待的。近 30 年来，洞庭湖区域林地向湖泊的转化最为显著，其次是河流、水库与池塘^[43]。人们生活水平的提高势必又会引起人们对农作物产量

的需求越来越大,导致城郊农业的发展,从而占据一部分湿地与湖泊,进一步加剧湿地与湖泊等自然水生生态单元的流失^[44]。退耕还湖政策对水生生态系统的补偿效应显著。2015-2021年政策实施期间,洞庭湖区新增水域213km²,占同期湖泊面积增长的53%,有效抵消68%的前期湿地损失。然而,城郊农业扩张对水域的负面影响仍在持续:2010-2021年,蔬菜种植面积增加412km²,导致11.3%约46km²的湖泊与湿地被改造为水田或养殖池塘,主要分布于岳阳、益阳等城市近郊。此外,水利设施建设如澧水皂市水库、沅江托口电站使水域面积增加540km²,72%用于农业灌溉,显著改善流域内38万公顷农田的灌溉条件^[45]。因此,从影响地表水长期时空变化的复杂性与全面性表明,我们很难独立计算某个驱动因素对地表水长期变化的贡献。未来研究需进一步结合地理加权回归GWR模型与结构方程模型SEM,量化各驱动因素的时空异质性,建立土地利用、人口增长、政策调控的多因素模型,以准确评估人类活动对地表水变化的贡献。

因此,近30年来,洞庭湖流域在水利工程建设和水资源政策执行方面取得了显著成效。人类活动,尤其是退耕还湖和水利工程的推进,不仅优化了流域内地表水的空间分布格局,而且在水体面积的增加和区域生态环境恢复方面发挥了积极的正向作用。

4 结论

(1) 揭示了洞庭湖流域地表水面积“全流域增长、子流域不均衡、时序分阶段”的多尺度时空分异规律,以往研究多局限于主湖区,本研究明确全流域地表水面积近30年间呈显著增长态势,但子流域间存在强烈空间异质性,沅江水系因高海拔水库群建设成为增长核心,资水水系因地形限制与气候波动增长最缓;时序上呈现“1990-1996年快速扩张,1997-2014年波动缩减,2015-2021年恢复增长”三阶段特征,反映了流域地表水动态与关键人类活动、气候变化的关系。

(2) 阐明了气候与人类活动“人类主导、气候辅助、子流域分化”的定量驱动机制。通过量化分析得出,人类活动对地表水面积变化的贡献度已超过气候变化,成为驱动地表水动态的主导力量。其中,水利工程的水量调控与“退耕还湖”等生态政策的空间修复,共同主导了地表水面积的时序波动与空间重构。

(3) 明确了洞庭湖流域地表水分布重心“西南迁移、东西向主导”的空间格局重塑逻辑。针对以往空间分析不足的问题,本研究发现流域地表水重心近30年间整体向西南迁移21.44km,且东西向位移主导空间重构过程,这一格局源于工程调控与生态修复的空间协同作用。沅江、澧水流域因高海拔水库蓄水形成人工水域,洞庭湖区西部退耕还湖新增自然水域,共同推动西部水域扩张;而湘江、资水下游受城市化侵占与降水波动影响,水域增长受限。这种“西扩东稳”的空间重构,本质是人类活动对流域水资源空间分配的主动调控,实现了东部与西部之间的间接均衡。

5 附件

附表 I 见电子版 (DOI: 10.18307/2026.0444)。

6 参考文献

- [1] Guțu C, Buzoianu O A C, Platagea G S, et al. The importance of global water resources in the survival of mankind. *Competitivitatea și inovarea în economia cunoașterii*. 2019: 261-265.
- [2] Arora N K. Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability*, 2019, 2(2): 95-96.
- [3] Cao Z G, Melack J M, Liu M, et al. Shifts, Trends, and Drivers of Lake Color Across China Since the 1980s. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(8): e2023GL103225.
- [4] Yang K, Yu Z, Luo Y, et al. Spatial-temporal variation of lake surface water temperature and its driving factors in Yunnan-Guizhou Plateau. *Water Resources Research*, 2019, 55(6): 4688-4703.
- [5] 朱松丽,蔡博峰,朱建华等. IPCC 国家温室气体清单指南精细化的主要内容和启示. *气候变化研究进展*, 2018, 14(1): 86-94. [ZHU S L, CAI B F, ZHU J H, et al. Key contents and insights of the IPCC national greenhouse gas inventory guidelines refinement.

- Advances in Climate Change Research, 2018, 14(01): 86-94.]
- [6] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2021, 2.
- [7] Kusangaya S, Warburton M L, Van Garderen E A, et al. Impacts of climate change on water resources in southern Africa: A review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 2014, 67: 47-54.
- [8] Du Y, Xue H, Wu S, et al. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th century. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(4): 1248-1255.
- [9] 李海生,杨鹤平,赵艳民.聚焦水生态环境突出问题,持续推进长江生态保护修复.环境工程技术学报,2022,12(2):336-347.[Li H S, Yang Q P, Zhao Y M, et al. Focusing on the prominent problems of water ecological environment and continuously promoting the ecological protection and restoration of the Yangtze River. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(02): 336-347.]
- [10] 杜耘,洞庭湖洲滩演化的量化研究及湖泊演变趋势分析.武汉:中国科学院测量与地球物理研究所,2009
- [11] Li J, Yin H, Chang J, et al. Sedimentation effects of the Dongting Lake area. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19: 287-298.
- [12] Yang L, Wang L, Yu D, et al. Four decades of wetland changes in Dongting Lake using Landsat observations during 1978–2018. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 124954.
- [13] Wang S, Meng W, Jin X, et al. Ecological security problems of the major key lakes in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74: 3825-3837.
- [14] 张闻松,宋春桥.中国湖泊分布与变化:全国尺度遥感监测研究进展与新编目.遥感学报,2022,26(1):92-103.[Zhang W S, Song C Q. Distribution and changes of lakes in China: Research progress and new catalog of national-scale remote sensing monitoring. *Journal of Remote Sensing*, 2022, 26(01): 92-103.]
- [15] Peng D, Xiong L, Guo S, et al. Study of Dongting Lake area variation and its influence on water level using MODIS data. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(1).
- [16] Luo J H, Ni G G, Zhang Y, et al. A new technique for quantifying algal bloom, floating/emergent and submerged vegetation in eutrophic shallow lakes using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 287: 113480.
- [17] 姜恒,李洪翔,徐悦,等.洞庭湖近 20 年水文情势特征及变化趋势.水生态学杂志,2025,46(1):213-224.[Jiang H, Li H X, Xu Y, et al. Characteristics and change trends of hydrological regime in Dongting Lake in recent 20 years. *Journal of Hydroecology*, 2025, 46(01): 213-224.]
- [18] 宋利娟,景海涛,徐嘉慧,陈探,张大鹏,宋春桥.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.遥感学报,2023,27(11):2516-2529.[Song L J, Jing H T, Xu J H, et al. High spatiotemporal resolution monitoring of water area changes in Dongting Lake by integrating radar and optical images of Sentinel satellite series. *Journal of Remote Sensing*, 2023, 27(11): 2516-2529.]
- [19] Hu Y, Huang J, Du Y, et al. Monitoring wetland vegetation pattern response to water-level change resulting from the Three Gorges Project in the two largest freshwater lakes of China. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 274-285.
- [20] Peng Y, He G, Wang G, et al. Surface Water Changes in Dongting Lake from 1975 to 2019 Based on Multisource Remote-Sensing Images. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1827.
- [21] Xing L, Tang X, Wang H, et al. Monitoring monthly surface water dynamics of Dongting Lake using Sentinel-1 data at 10 m. *PeerJ*, 2018, 6: e4992.
- [22] Wang Z, Xie F, Ling F, et al. Monitoring Surface Water Inundation of Poyang Lake and Dongting Lake in China Using Sentinel-1 SAR Images. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3473.
- [23] 李景保,王克林,秦建新等.洞庭湖年径流泥沙的演变特征及其动因.地理学报,2005(3):503-510.[LI J B, WANG K L, QIN J X, et al. Evolution characteristics and driving forces of annual runoff sediment in Dongting Lake. *Acta Geographica Sinica*, 2005(03): 503-510.]
- [24] 程俊翔,徐力刚,姜加虎等.洞庭湖流域径流量对气候变化和人类活动的响应研究.农业环境科学学报,2016,35(11):2146-2153.[CHENG J X, XU L G, JIANG J H, et al. Response of runoff in the Dongting Lake Basin to climate change and human activities.

Journal of Agro-Environmental Science, 2016, 35(11): 2146-2153.]

- [25] Wang X, Xiao X, Zou Z, et al. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989–2016. *Nature communications*, 2020, 11(1): 3471.
- [26] Xu L, Chen N, Zhang X, et al. Spatiotemporal changes in China's terrestrial water storage from GRACE satellites and its possible drivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(22): 11976-11993.
- [27] 曹洁萍,迟道才,武立强,等.Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究.农业科技与装备,2008,(5):35-37+40.
- [28] Lu S, Wu B, Wei Y, et al. Quantifying impacts of climate variability and human activities on the hydrological system of the Haihe River Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73: 1491-1503.
- [29] 陈世群, 高伟, 陈孝琪, 等. 一种基于极限学习机和皮尔逊相关系数的光伏阵列故障快速诊断方法. 电气技术, 2021, 22(10): 57-64.[CHEN S Q, GAO W, CHEN X Q, et al. A rapid fault diagnosis method for photovoltaic arrays based on extreme learning machine and Pearson correlation coefficient. *Electrical Engineering Technology*, 2021, 22(10): 57-64.]
- [30] 徐建华, 岳文泽. 近 20 年来中国人口重心与经济重心的演变及其对比分析. 地理科学, 2001, 21(5): 385-389.[XU J H, YUE W Z. The evolution and comparative analysis of the centers of gravity of population and economy in China over the past 20 years. *Geographical Sciences*, 2001, 21(5): 385-389.]
- [31] 黄李东,叶爱中,张疋亥,等.近 30 年中国典型区域水体面积变化与归因.南水北调与水利科技,2019,17(6):138-147+186.[Huang L D, Ye A Z, Zhang P H, et al. Changes and attribution of water body areas in typical regions of China over the past 30 years. *South - to - North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(6): 138-147+186.]
- [32] Hoek van Dijke A J, Herold M, Mallick K, et al. Shifts in regional water availability due to global tree restoration. *Nature Geoscience*, 2022, 15(5): 363-368.
- [33] Green T R, Taniguchi M, Kooi H, et al. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 2011, 405(3-4): 532-560.
- [34] Qin D, Lu C, Liu J, et al. Theoretical framework of dualistic nature–social water cycle. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59: 810-820.
- [35] Tang L, Long H, Aldrich D P. Putting a Price on Nature: Ecosystem Service Value and Ecological Risk in the Dongting Lake Area, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(5): 4649.
- [36] Wang Z, Wu J, Madden M, et al. China's wetlands: conservation plans and policy impacts. *Ambio*, 2012, 41: 782-786.
- [37] Sun Z, Sun W, Tong C, et al. China's coastal wetlands: conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement. *Environment International*, 2015, 79: 25-41.
- [38] Bian H, Li W, Li Y, et al. Driving forces of changes in China's wetland area from the first (1999–2001) to second (2009–2011) National Inventory of Wetland Resources. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: e00867.
- [39] Cultivated Land Change, Driving Forces and Its Impact on Landscape Pattern Changes in the Dongting Lake Basin
- [40] Alexander P, Rounsevell M D A, Dislich C, et al. Drivers for global agricultural land use change: The nexus of diet, population, yield and bioenergy. *Global Environmental Change*, 2015, 35: 138-147.
- [41] Shulse C D, Semlitsch R D, Trauth K M, et al. Influences of design and landscape placement parameters on amphibian abundance in constructed wetlands. *Wetlands*, 2010, 30: 915-928.
- [42] Xiong Y, Wang K. Eco-compensation effects of the wetland recovery in Dongting Lake area. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20: 389-405.
- [43] Yang Z M, Han L F, Liu Q P, et al. Spatial and temporal changes in wetland in Dongting Lake Basin of China under long time series from 1990 to 2020. *Sustainability*, 2022, 14(6): 3620.
- [44] Lu C, Wang Z, Li L, et al. Assessing the conservation effectiveness of wetland protected areas in Northeast China. *Wetlands Ecology and Management*, 2016, 24: 381-398.
- [45] Gany A H A, Sharma P, Singh S. Global review of institutional reforms in the irrigation sector for sustainable agricultural water management, including water users' associations. *Irrigation and drainage*, 2019, 68(1): 84-97.

附表 I 1990-2020 年洞庭湖流域及其各水系水体空间分布重心变化

Append. Tab.I Changes in the gravity center of spatial distribution of water bodies in the Lake Dongting Basin and its systems,
1990-2020

区域	年份	经度(°)	纬度(°)	移动方向	移动距离 (km ²)
洞庭湖流 域	1990	112.063	28.128	——	——
	1995	111.843	28.100	西南	24.692
	2000	111.927	27.993	东南	15.221
	2005	111.872	28.114	西北	14.851
	2010	111.910	28.036	东南	9.695
	2015	111.832	28.065	西北	9.258
	2020	111.877	28.075	东北	5.188
洞庭湖水 系	1990	112.509	29.203	——	——
	1995	112.458	29.185	西南	6.008
	2000	112.475	29.147	东南	4.624
	2005	112.427	29.165	西北	5.729
	2010	112.443	29.163	东南	1.804
	2015	112.438	29.195	西北	3.657
	2020	112.443	29.223	东北	3.154
湘江水系	1990	112.540	26.897	——	——
	1995	112.539	26.939	西北	4.699
	2000	112.640	26.865	东南	13.981
	2005	112.606	26.851	西南	4.078
	2010	112.631	26.864	东北	3.060
	2015	112.573	26.850	西南	6.575
	2020	112.618	26.930	东北	10.218
资水水系	1990	111.270	27.744	——	——
	1995	111.183	27.454	西南	33.723
	2000	111.165	27.452	西南	1.967
	2005	111.186	27.493	东北	5.128
	2010	111.192	27.456	东南	4.198
	2015	111.151	27.423	西南	5.816
	2020	111.174	27.414	东南	2.689
沅江水系	1990	110.209	27.977	——	——
	1995	109.805	27.978	西北	44.850
	2000	109.876	27.904	东南	11.466
	2005	109.932	27.928	东北	6.746
	2010	109.858	27.905	西南	8.611
	2015	109.780	27.851	西南	10.523
	2020	109.808	27.880	东北	4.487
澧水水系	1990	111.091	29.545	——	——
	1995	111.183	29.534	东南	10.225
	2000	111.136	29.505	西南	6.090

2005	111.103	29.515	西北	3.792
2010	111.117	29.524	东北	1.828
2015	111.119	29.537	东北	1.473
2020	111.132	29.522	东南	2.243
