

基于Google Earth Engine的江西省湖泊面积时空演变及驱动因素分析

林伊静^{1,2}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²云南师范大学, 西部资源环境地理信息技术教育部工程技术研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月24日; 发布日期: 2026年8月20日

摘 要

湖泊是区域水循环和生态系统的重要组成部分, 其面积变化与水资源安全、湿地生态和区域可持续发展密切相关。江西省湖泊受季风降水、鄱阳湖水系格局与人类活动共同影响, 湖泊面积变化直接关系到洪旱调蓄、湿地保护和水资源配置。本文依托GEE平台, 基于Landsat/JRC水体数据, 结合水体指数、人机校核、面积分级和分区统计, 构建2001~2020年江西省面积大于0.1 km²的湖泊变化数据集, 并采用趋势分析和Pearson相关系数探讨气候与人文因素的影响。结果表明: 2020年江西省湖泊共2249个, 总面积4488.35 km², 约占全省陆域面积的2.69%; 2001~2020年湖泊数量呈“增长-下降-再增长”变化, 面积呈“前期萎缩-后期扩张”特征。1~10 km²湖泊扩张最明显; 赣北湖泊变化主要受鄱阳湖及滨湖水系控制, 赣中稳步增长, 赣南短周期波动突出。相关分析显示, 湖泊数量对气候波动和产业结构变化更敏感, 而湖泊总面积更多受大型湖泊水位过程和水系连通格局影响。研究结果有助于认识江西省湖泊的长期变化特征及区域差异, 并可为湖泊动态监测、洪旱风险评估和水生态保护研究提供参考。

关键词

Google Earth Engine, 湖泊面积, 时空变化, 驱动因素, 江西省

Analysis of Spatiotemporal Evolution and Driving Factors of Lake Area in Jiangxi Province Based on GEE

Yijing Lin^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²The Engineering Research Center of GIS Technology in Western China, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Abstract

Lakes are important components of regional hydrological and ecological systems, and their area changes are closely related to water security, wetland ecology, and regional sustainable development. Lakes in Jiangxi Province are jointly affected by monsoon precipitation, the Poyang Lake water system, and human activities, and their area dynamics directly influence flood and drought regulation, wetland conservation, and water resource allocation. Based on the Google Earth Engine platform, Landsat/JRC water data, water indices, human-machine verification, area classification, and regional statistics were integrated to construct a dataset of lake changes larger than 0.1 km² in Jiangxi Province from 2001 to 2020. Trend analysis and Pearson correlation analysis were used to explore the relationships between lake changes and climatic and socioeconomic factors. The results show that in 2020, Jiangxi Province had 2249 lakes with a total area of 4488.35 km², accounting for about 2.69% of the provincial land area. From 2001 to 2020, the number of lakes showed an “increase - decrease - re-increase” pattern, whereas lake area showed “early shrinkage followed by later expansion”. Lakes of 1~10 km² expanded most obviously; lake changes in northern Jiangxi were mainly controlled by Poyang Lake and its connected water system, central Jiangxi showed steady growth, and southern Jiangxi was characterized by short-term fluctuations. Correlation results indicate that lake number is more sensitive to climatic variability and industrial-structure changes, while total lake area is more strongly constrained by large-lake water-level processes and hydrological connectivity. These results improve understanding of the long-term dynamics and regional differences of lakes in Jiangxi Province and may serve as a reference for lake monitoring, flood-drought risk assessment, and aquatic ecosystem conservation.

Keywords

Google Earth Engine, Lake Area, Spatiotemporal Changes, Driving Factors, Jiangxi Province

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湖泊是陆地水循环和区域生态系统的重要组成部分[1], 承担径流调蓄、洪旱缓冲、生境维持和区域气候调节等功能。湖泊面积的扩张或萎缩不仅反映水量收支变化, 也会影响湿地生态过程、土地利用格局和区域水资源安全[2] [3]。江西省位于长江中下游南岸, 境内河网密集, 鄱阳湖及其相连水系构成全省湖泊资源的主体[4] [5]。虽然江西省水资源总量较丰富, 但受季风气候、年际降水波动、地形分异和水利调控能力有限等因素影响, 水资源在时间和空间上分配不均, 汛期洪涝风险与枯水期水量不足并存[6]。因此, 准确识别湖泊面积变化及其相关因素, 有助于理解江西省水生态过程及其区域差异[7]。

遥感技术为湖泊动态监测提供了连续、客观且可重复的数据来源[7]。传统湖泊监测依赖地形图、实地调查或单景影像解译, 难以兼顾大范围覆盖和长时间序列一致性。随着 Landsat 等中分辨率卫星数据的长期积累, 基于多光谱影像的水体指数方法逐渐成为湖泊提取的重要手段[8]。其中, NDWI [9]、MNDWI [10]等指数通过强化水体与植被、土壤、建设用地在可见光、近红外和短波红外波段上的光谱差异, 提高了水体识别效率。与此同时, Google Earth Engine (GEE)云平台集成了大规模遥感影像与并行计算能力, 可

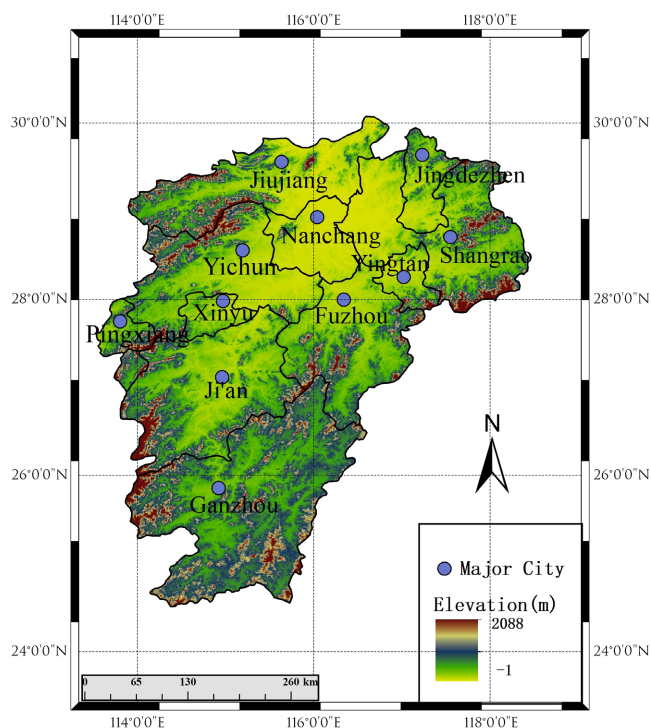
显著降低长期序列影像筛选、计算和制图的技术门槛,为省域尺度湖泊变化研究提供了可行路径[8][11]。

已有研究围绕水体提取算法、湖泊面积变化和湖泊演变机制开展了大量探索,但在江西省尺度上仍存在进一步深化的空间[2][3][12]。一方面,既有研究多集中于典型湖泊、局部流域或单一时相,省域范围内兼顾长时间序列、面积等级和区域分异的研究相对不足;另一方面,湖泊面积变化受自然气候与人类活动共同影响,单纯描述面积增减难以揭示变化背后的区域差异和潜在机制[13]。江西省湖泊具有“数量多、单体面积差异大、集中分布于鄱阳湖流域”的特征,小微湖泊、库塘和季节性积水在遥感影像中容易与稳定湖泊混淆,河流与湖泊的边界也存在识别难度。因此,在自动化水体提取基础上引入必要的人工校核,并从面积等级和地理分区两个维度组织结果,有助于提高湖泊变化分析的解释力[14]。

基于上述问题,本文以江西省面积大于 0.1 km^2 的湖泊为研究对象,依托 GEE 平台获取并处理 2001~2020 年水体遥感数据,结合水体指数提取、矢量校核和面积统计,构建江西省湖泊时空变化数据集。在此基础上,本文从三个层面展开分析:首先,刻画全省湖泊数量与面积的总体变化过程;其次,比较 $0.1\sim 1 \text{ km}^2$ 、 $1\sim 10 \text{ km}^2$ 和大于 10 km^2 湖泊的差异化演变特征,并分析赣北、赣中和赣南地区的空间分异;最后,将湖泊变化与降水、气温、人口和产业结构等因子进行相关分析,讨论自然和人文因素对湖泊演变的可能影响。本文旨在回答两个核心问题:2001~2020 年江西省湖泊面积和数量呈现何种阶段性变化?不同面积等级和区域湖泊对气候与人文因子的响应是否存在差异?通过上述分析,本文旨在增进对江西省湖泊长期变化、面积等级差异和区域分异特征的认识。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况



注:该图基于中国科学院资源环境科学数据平台下载,
<https://doi.org/10.12078/2023010102>,在此地图上进行了颜色等绘制。

Figure 1. Location map of the study area

图 1. 研究区概况

如图 1 所示,江西省位于中国东南部、长江中下游南岸,地理范围约为东经 113°34'~118°28'、北纬 24°29'~30°04',东邻浙江、福建,南接广东,西连湖南,北与湖北、安徽隔江相望。全省地貌以山地、丘陵和平原相间分布为主要特征,整体呈南高北低、向鄱阳湖汇集的地势格局。赣江、抚河、信江、饶河和修水等水系由南向北汇入鄱阳湖,并进一步与长江相连,形成以鄱阳湖流域为核心的湖泊-河网复合系统。

江西省湖泊空间分布具有明显区域差异。赣北地区受鄱阳湖及其滨湖平原控制,湖泊集中、面积较大,是全省湖泊变化的主体区域;赣中地区地形由丘陵和平原过渡,湖泊多沿河谷、低洼地和水库周边分布;赣南地区以山地丘陵为主,湖泊规模相对较小,水体变化更易受局地降水和地形汇流过程影响。基于湖泊分布、地形水系和行政区划差异,本文将研究区划分为赣北、赣中和赣南三个分区,以比较不同区域湖泊面积变化特征。

2.2. 数据来源及预处理

本文数据主要包括湖泊水体遥感数据、气象数据、社会经济数据和辅助解译数据。水体数据基于 GEE 平台获取,主要采用 Landsat 系列影像及 JRC Global Surface Water Monthly History v1.4 数据集。考虑江西省湖泊具有显著季节波动,为降低汛期与枯水期差异对年际比较的干扰,遥感影像优先选取各年份 8~10 月云量较低的观测数据。气象数据包括年平均降水量和年平均气温,社会经济数据包括年末总人口以及第一、二、三产业增加值占 GDP 比重。辅助数据包括江西省边界、主要河流空间位置、2020 年全国水体矢量资料和 Google Earth 影像,用于湖泊对象校核与河流、临时积水等非目标水体剔除。各类数据来源及预处理过程见表 1。

Table 1. Data sourcing and preprocessing

表 1. 数据来源与预处理

所需数据	数据来源	数据预处理
湖泊水体数据	GEE 平台中的 Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+、Landsat 8 OLI 影像及 JRC Global Surface Water Monthly History v1.4 数据集。	筛选 2001~2020 年水体数据,优先采用 8~10 月低云量影像;在 GEE 中进行水体指数计算、最大水体范围合成和二值化输出。
人文数据	《江西统计年鉴》及江西省统计局公开数据。	提取 2001~2020 年年末总人口、第一产业增加值占 GDP 比重、第二产业增加值占 GDP 比重和第三产业增加值占 GDP 比重,并进行年度序列整理。
气象数据	ERA5-Land 逐年平均降水和平均气温数据;中国 1 km 分辨率逐月/逐年平均气温栅格数据作为补充。	统一坐标系统和时间尺度,按江西省边界裁剪并统计年尺度平均值。

2.3. 研究方法

本文依托 GEE 平台对 Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+、Landsat 8 OLI 影像及 JRC Global Surface Water 数据进行筛选与预处理,结合 NDWI [15]、MNDWI [9] 等水体指数增强水体信息,并通过长期地表水数据和人工校核提高湖泊提取结果的一致性[16],并利用 Pearson 相关系数分析湖泊变化与气候、人文因素之间的同步关系。为提高方法可理解性,图 2 给出了江西省湖泊水体提取与时空变化分析流程。

2.3.1. 水体指数计算与候选水体提取

根据水体与植被、裸地和建设用地在绿光、近红外和短波红外波段上的光谱差异,本文计算归一化水体指数(NDWI)和改进型归一化水体指数(MNDWI):

$$\text{MNDWI} = \frac{(\text{Green} - \text{SWIR})}{(\text{Green} + \text{SWIR})} \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{(\rho_{Green} - \rho_{NIR})}{(\rho_{Green} + \rho_{NIR})} \quad (2)$$

式中, ρ_{Green} 、 ρ_{NIR} 和 ρ_{SWIR1} 分别表示绿光、近红外和第一短波红外波段的地表反射率。

在水体指数增强的基础上, 对各年度影像进行二值化处理, 并结合 JRC Global Surface Water Monthly History v1.4 数据中的同期水体记录, 对 Landsat 提取结果进行辅助判读和长时间序列一致性检查。随后合成各年份 8~10 月的最大水体范围, 获得年度候选水体分布。该处理方式主要用于降低单景影像云覆盖和局部漏提取对省域湖泊识别的影响, 但所得结果表示的是相应观测时段内的最大水面范围, 而非严格意义上的全年平均水面面积。

2.3.2. 湖泊对象筛选与人机校核

自动提取结果中可能包含河流、季节性积水、云影、山体阴影及边界不稳定的小型水体, 因此进一步开展人工校核。校核主要参考 Landsat 原始影像、水体指数结果、JRC 同期水体记录、2020 年全国水体矢量资料和 Google Earth 影像, 重点删除误提取斑块、修正湖泊边界, 并根据水体形态和空间连接关系区分湖泊与线状河流, 对不合理分割进行合并或调整。校核完成后, 将水体栅格转为矢量斑块, 并在 Krasovsky 1940 Albers 等面积投影下计算面积, 仅保留面积大于 0.1 km² 的面状水体。本文所称“湖泊”包括天然湖泊、水库、塘坝及较稳定的季节性面状水体。

在完成年度湖泊数据整理后, 按照 0.1~1 km²、1~10 km² 和大于 10 km² 三个等级进行分类, 并统计赣北、赣中和赣南地区的湖泊数量及面积。采用线性趋势拟合分析湖泊数量和面积的变化方向及年变化速率, 并采用 Pearson 相关系数分析湖泊变化与年平均降水量、年平均气温、年末总人口及三次产业增加值占 GDP 比重之间的相关关系。

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: R_{xy} 为 x 、 y 两个变量的相关系数; n 为样本数, $n = 20$; x_i 为第 i 年/月湖泊数量/面积与驱动因子的年度观测值, $\bar{x}$ 为 x_i 的平均值; y_i 为第 i 年/月的降水量或气温; $\bar{y}$ 为 y_i 的平均值。

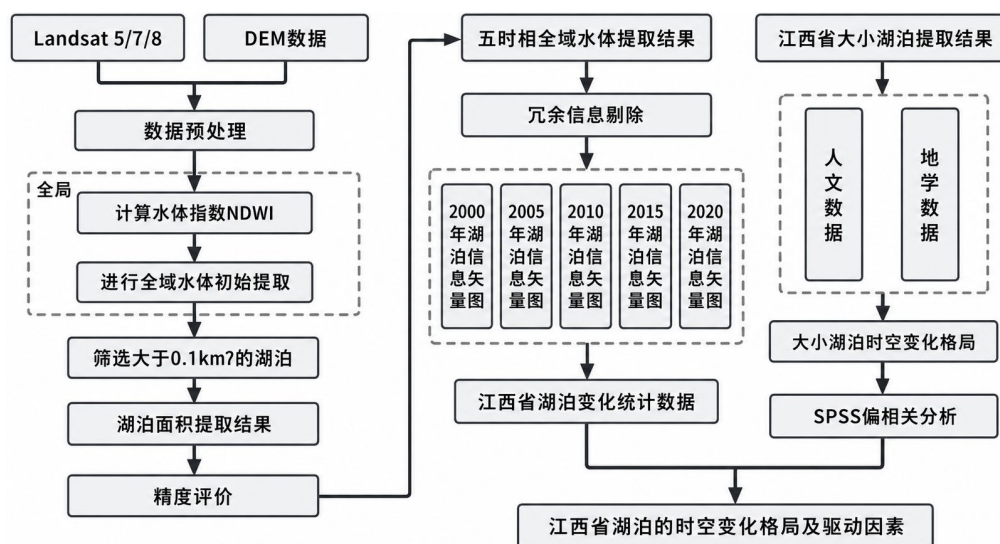


Figure 2. Technical roadmap
图 2. 技术路线图

3. 结果分析

3.1. 江西省湖泊时空动态变化特征分析

2020 年,江西省内的湖泊总面积达到 4488.35 km², 占据全省总面积的 2.69%(见图 3)。其中,共有湖泊 2249 个,面积分布在不同等级:大于 10 km²的湖泊有 29 个,大于 1 km²的湖泊共计 264 个,而 0.1~1 km²的湖泊则多达 1985 个。这些湖泊的地理分布主要集中在赣北地区的鄱阳湖流域,特别是鄱阳湖盆地。该区域的地形特征明显,地势南高北低,周边三面环山,中部为丘陵地带,整体上呈现出一个向北敞口的大盆地形态。鄱阳湖流域作为江西省的主要流域,其地貌特征显著,北部以鄱阳湖平原为主,南部则以赣南山地为主,中部赣中丘陵山区作为过渡区,为江西省湖泊分布的形成提供了独特的地理环境。

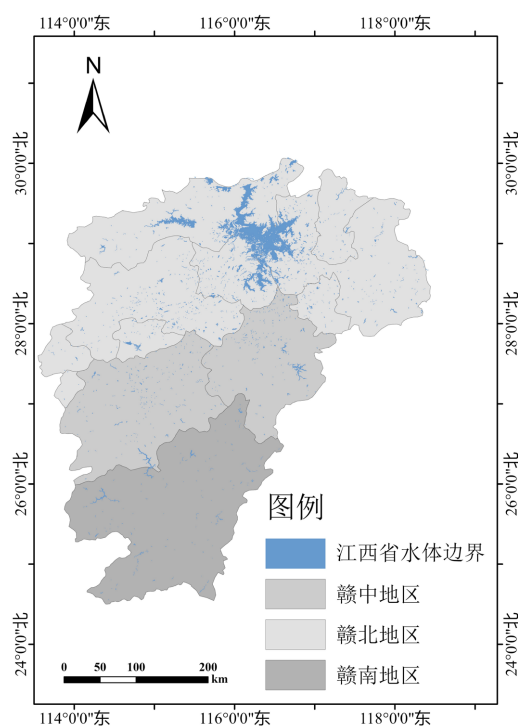


Figure 3. Map of lake distribution in Jiangxi Province in 2020

图 3. 2020 年江西省湖泊分布图

基于 2001 年至 2020 年的湖泊提取数据,本研究对江西省近 20 年来大于 0.1 km²的湖泊面积进行了详尽的长时间序列变化分析。如图 4 所示,在这二十年的观测期内,江西省的湖泊总数量与总面积均呈现出显著的变化趋势,大致呈现出稳定的增长态势。

湖泊总数量在研究期间呈现稳步增长 - 缓慢下降 - 稳步增长的趋势。2001 年至 2006 年,湖泊总数以 46.2 个/年的变化率上升,整体数量呈现扩张趋势,但 2006 至 2012 年,湖泊总数量以 13.6 个/年的变化率下降,湖泊总数量的最低值也出现在这一期间,为 2008 年。随后,2013 年开始,湖泊总数又以 40.97 个/年的变化率上升,再次呈现稳步增长的态势,直至 2020 年湖泊总数量达到最高峰。

湖泊总面积在研究期间呈现快速萎缩 - 缓慢扩张的趋势。2001 年至 2009 年,湖泊总面积以 124.63 km²/年的变化率下降,湖泊总面积最低值也出现在这一期间。随后,2009 至 2020 年,湖泊总面积以 47.56 km²/年的变化率增长,直至 2020 年湖泊总面积达到最高峰。面积变化的阶段性反转表明,江西省湖泊系统具有较强的年际波动性,后续研究和监测需同时关注丰水期水面扩张与枯水期生态水量变化。

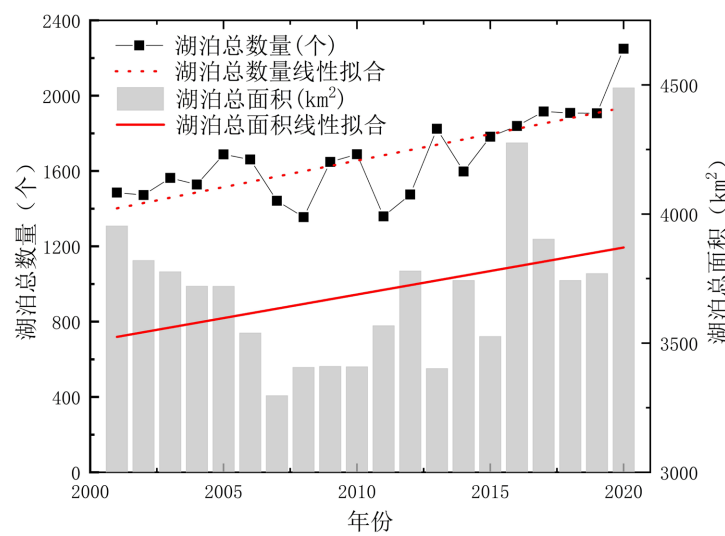


Figure 4. Overall changes in the area and number of lakes in Jiangxi Province from 2000 to 2020
图 4. 2000~2020 年江西省湖泊面积、数量总体变化

3.2. 江西省不同面积等级湖泊变化特征

基于 2001 年至 2020 年的湖泊提取数据，本研究对江西省内大于 0.1 km² 的湖泊进行了分类，并将其划分为 0.1~1 km²、1~10 km² 以及大于 10 km² 三个面积等级。每五年进行一次统计，详细记录了不同等级湖泊的数量和面积变化情况。如表 2 所示，这些湖泊的面积与数量在不同等级中均呈现出显著的增长趋势，同时随着湖泊面积等级的提高，湖泊的数量与面积变化更加趋于稳定。这表明，较大面积的湖泊在长时间的尺度上显示出更高的稳定性，可能与其生态系统的自我维持能力有关。

Table 2. Changes in the number and area of lakes of different size categories from 2001 to 2020
表 2. 2001~2020 年不同面积等级湖泊数量、面积变化

面积分级(km ²)	2001		2005		2010		2015		2020	
	数量	面积(km ²)	数量	面积(km ²)	数量	面积(km ²)	数量	面积(km ²)	数量	面积(km ²)
0.1~1 km ²	1277	405.58	1459	390.84	1478	386.51	1527	422.47	1985	532.39
1~10 km ²	185	480.59	205	495.89	187	451.63	228	569.63	235	573.11
>10 km ²	23	3247.38	24	2833.17	24	2570.57	27	2533.92	29	3382.85
全部	1485	4133.54	1688	3719.90	1689	3408.71	1782	3526.03	2249	4488.35

为了更深入地描述江西省不同面积等级湖泊的变化特征，本研究选择具有代表性且较为稳定的 1~10 km² 与大于 10 km² 的湖泊进行拟合分析，以更准确地把握湖泊面积变化的规律，为湖泊资源的保护与管理提供科学依据。从面积变化看(图 5)，1~10 km² 湖泊扩张最为明显，年变化速率为 6.48 km²/年；大于 10 km² 湖泊面积总体相对稳定，但内部仍经历“快速萎缩 - 快速扩张 - 波动调整”的阶段变化。进一步看，1~10 km² 湖泊面积呈现“波动萎缩 - 快速扩张 - 缓慢扩张”的过程，说明中型湖泊既受气候水文条件影响，也可能受到水库塘坝建设、岸线利用和湿地恢复等人类活动影响。从数量变化看(图 6)，1~10 km² 湖泊和大于 10 km² 湖泊数量均呈增加趋势，其中 1~10 km² 湖泊增长更明显，年变化速率为 2.71 个/年；大于 10 km² 湖泊数量增长较慢，年变化率为 0.21 个/年。面积等级差异表明，不同面积等级湖泊表现出差异化变化特征，后续监测可同时关注大型湖泊的水位变化以及中小型湖泊的扩张、萎缩和功能转换。

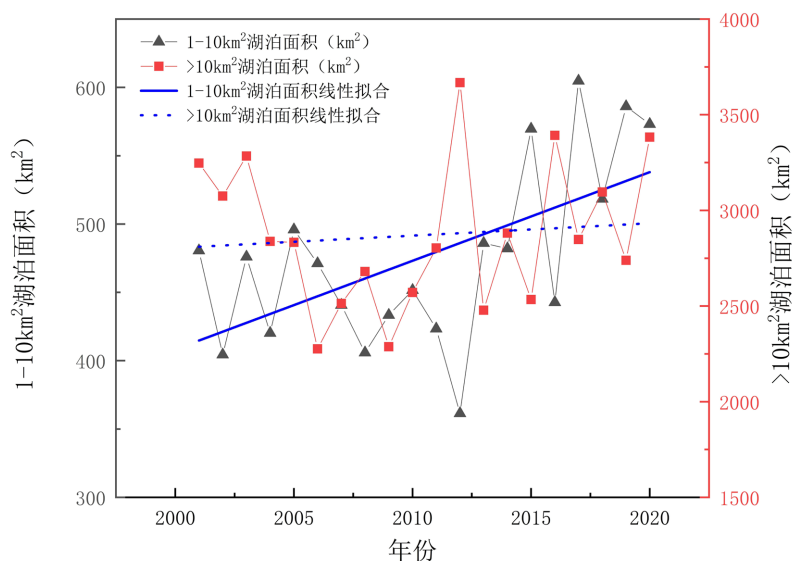


Figure 5. Changes in lake area within 1~10 km² and >10 km² in Jiangxi Province

图 5. 江西省 1~10 km² 和 >10 km² 湖泊面积变化

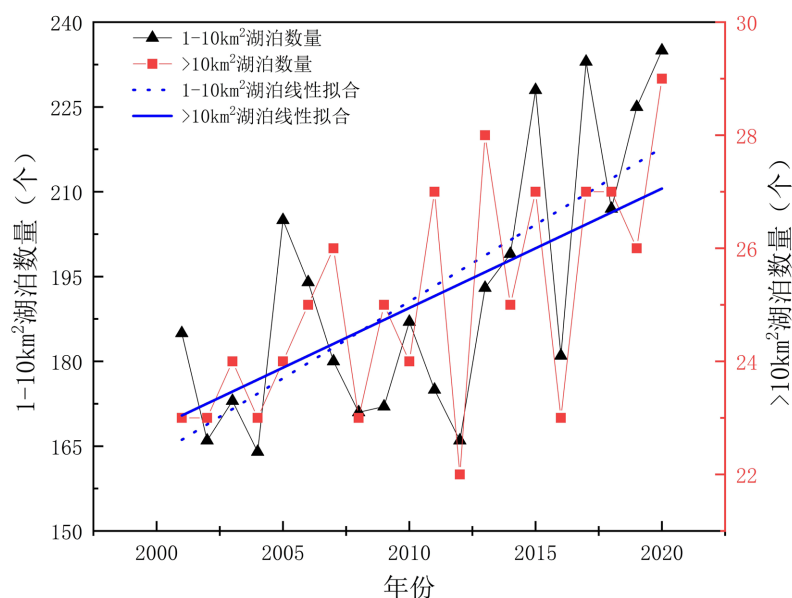


Figure 6. Changes in the number of lakes within 1~10 km² and >10 km² in Jiangxi Province

图 6. 江西省 1~10 km² 和 >10 km² 湖泊数量变化

3.3. 江西省不同区域湖泊变化特征

湖泊变化具有显著区域分异。赣北地区湖泊面积长期保持在较高水平，是江西省湖泊面积变化的主体区域。2001~2020 年，赣北湖泊面积总体在 3000~4000 km² 以上波动，2015 年降至约 3214.0 km²，随后快速扩张，2020 年达到 4124.37 km²。该区域湖泊变化主要受鄱阳湖及其滨湖水系控制，鄱阳湖水位波动、入湖径流变化和滨湖湿地水面转换共同决定了赣北湖泊面积的阶段性升降(图 7)。赣北湖泊变化与长江中下游洪水调蓄、候鸟栖息地和滨湖地区水资源条件密切相关，是认识江西省湖泊变化及其生态影响的关键区域。

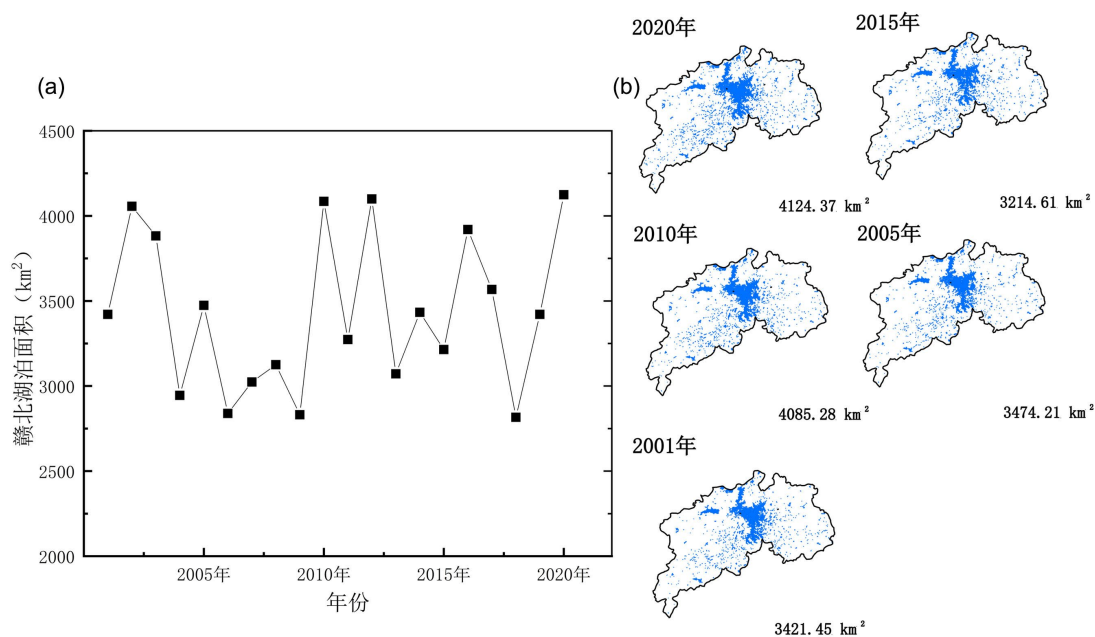


Figure 7. Changes in lake area (a) and spatial trends (b) in northern Jiangxi
图 7. 赣北地区湖泊面积变化(a)和空间变化趋势(b)

赣中地区湖泊面积呈相对稳定的增长趋势。2001 年赣中湖泊面积为 216.16 km^2 , 2020 年增加至 276.40 km^2 , 增长幅度虽低于赣北, 但变化方向较为一致。该区域湖泊多分布于抚州东南部、吉安南部及河谷低洼地带, 湖泊扩张可能与局地水库塘坝建设、河谷汇水条件和区域水资源利用方式变化有关。与赣北相比, 赣中缺少超大型湖泊控制, 因而总面积变化较平缓(图 8)。

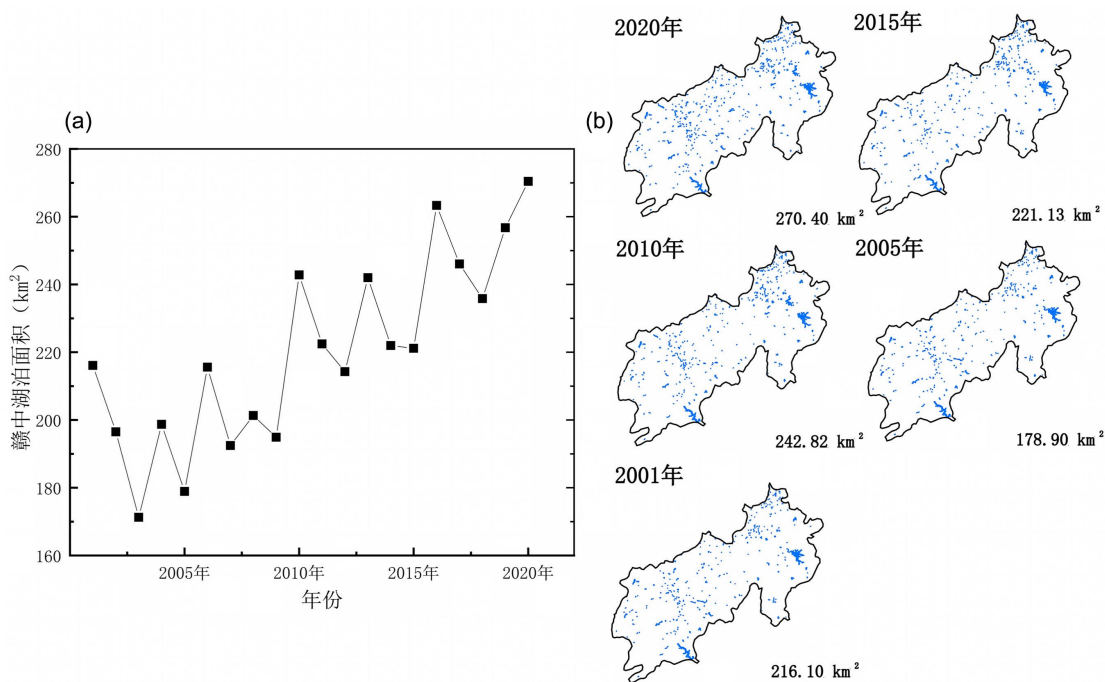


Figure 8. Changes in lake area (a) and spatial trends (b) in central Jiangxi
图 8. 赣中地区湖泊面积变化(a)和空间变化趋势(b)

赣南地区湖泊面积以波动变化为主，未表现出持续增长或持续萎缩趋势。2001~2002年、2004~2005年和2010~2011年均出现阶段性萎缩，2011年湖泊面积降至约127.98 km²，为研究期内低值，随后又逐步恢复至平均水平附近。赣南以山地丘陵为主，湖泊规模较小、分布分散，水体面积对降水过程和局地地形汇流更为敏感，因此其变化更容易呈现短周期波动(图9)。

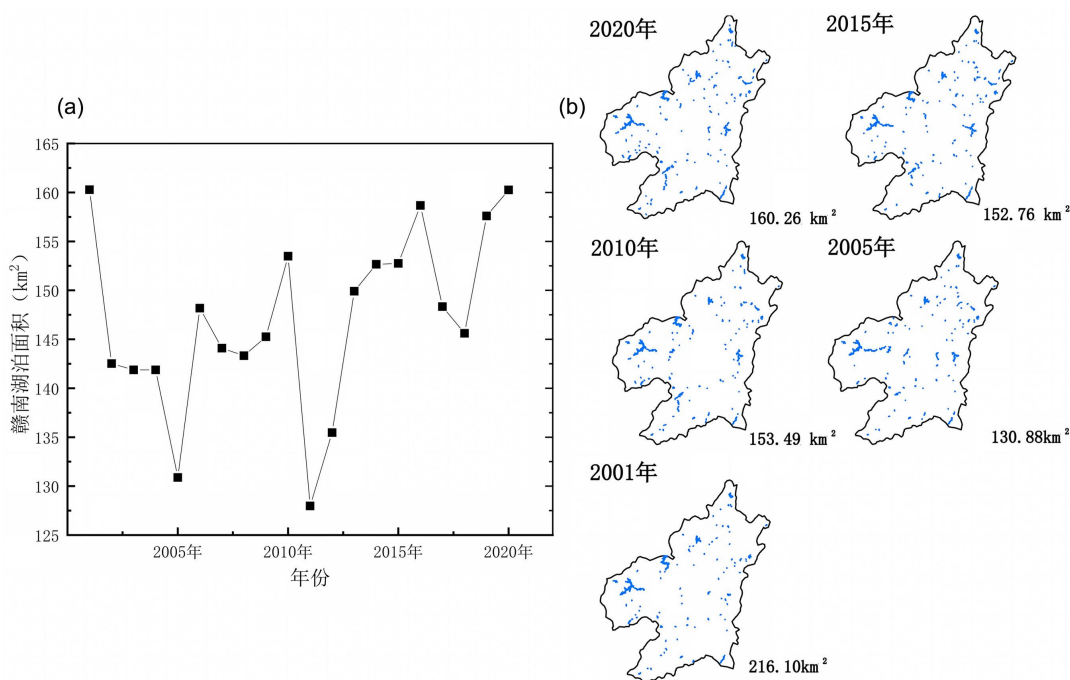
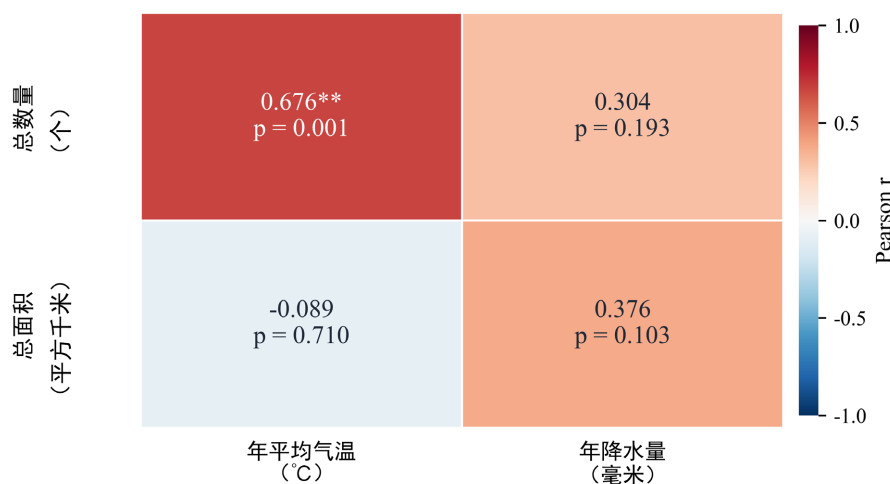


Figure 9. Changes in lake area (a) and spatial trends (b) in southern Jiangxi

图 9. 赣南地区湖泊面积变化(a)和空间变化趋势(b)

3.4. 江西省湖泊变化与气候及人文因素的相关性



r为Pearson相关系数（双侧检验）；* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001; n=20

Figure 10. Heatmap of correlation coefficients of climate factors

图 10. 气候因素相关系数热力图

气候因子与湖泊数量的相关性强于其与湖泊面积的相关性。Pearson 相关分析显示, 年均气温与湖泊总数量呈显著正相关, 相关系数为 0.676, 并通过 1%显著性检验; 年降水量与湖泊总数量的相关系数为 0.304, 相关性较弱且未通过显著性检验。湖泊总面积与年均气温和年降水量的相关系数分别为-0.089 和 0.376, 均未表现出显著相关关系。这表明气候波动可能更容易影响小型湖泊和湖泊斑块数量, 而全省湖泊总面积主要受大型湖泊水位过程、地形蓄水条件及区域水系连通性共同影响(图 10)。

人文要素方面, 第三产业增加值占 GDP 比重与湖泊总数量的相关性最高, 相关系数为 0.846, 并通过 1%显著性检验; 年末总人口数与湖泊总数量的相关系数为 0.664, 第一产业占比与湖泊总数量的相关系数为 0.597, 均表现出较强负相关。相比之下, 第二产业占比与湖泊总数量的相关系数为 0.327, 相关性较弱。对湖泊总面积而言, 第三产业占比和第二产业占比分别与其呈弱相关, 相关系数为 0.435 和-0.411, 且仅达到较低显著性水平; 第一产业占比和年末总人口数与湖泊总面积的相关性均不显著。总体来看, 人文要素对湖泊数量变化的解释力强于对湖泊总面积变化的解释力, 但相关性结果仅反映变量之间的同步变化关系, 不能直接等同于因果驱动(图 11)。

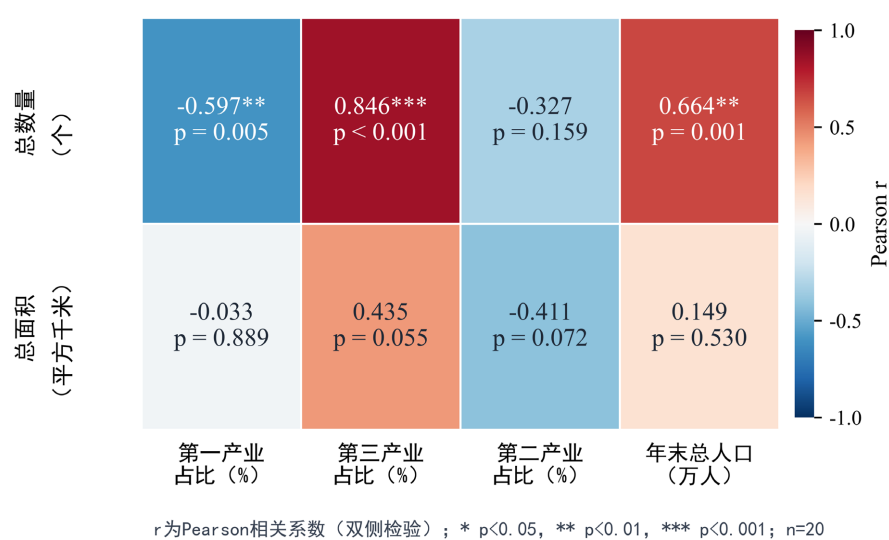


Figure 11. Heatmap of correlation coefficients of human factors
图 11. 人文因素相关系数热力图

4. 结论与讨论

4.1. 结论

本实验以 2001 至 2020 年间 Landsat 影像为数据源, 结合 GEE 遥感数据处理云平台和水体遥感指数进行湖泊提取, 获取了 4 个不同时段江西省湖泊水体变化。

(1) 无论大小面积, 2001~2020 年, 江西省湖泊数量和面积经历了显著变化。湖泊数量先增后减再增, 2001~2006 年和 2013~2020 年增加, 2006~2012 年减少; 湖泊面积则先快速下降后缓慢增长, 2001~2009 年下降, 2009~2020 年增长, 最终两者在 2020 年均达到高峰。

(2) 2001~2020 年间, 江西省不同面积等级的湖泊在数量与面积上均呈现显著增长趋势。面积上, 1~10 km² 的湖泊扩张最为显著, 而大于 10 km² 的湖泊则表现出相对稳定的态势。数量上, 1~10 km² 的湖泊增长速率远高于大于 10 km² 的湖泊, 但后者增长趋势更为平稳。

(3) 根据气候条件以及人类活动区域的区别, 将江西省分为赣北、赣中、赣南三部分, 各地区分湖泊

面积变化显著, 各具特点。赣北湖泊面积波动较大, 主要受鄱阳湖影响。赣中湖泊面积稳步增长, 主要源于抚州东南与吉安南部湖泊。赣南湖泊面积则呈显著扩张与萎缩交替模式, 无长期增长或减少趋势, 波动幅度明显。

(4) 气象因素驱动分析表明气温变化对湖泊数量影响较大, 而降雨变化影响较微弱。人文要素驱动分析显示第三产业占比与湖泊数量显著正相关, 第二产业占比与湖泊数量相关性较低; 第一产业占比和年末总人口数与湖泊面积相关性不显著。

4.2. 讨论

4.2.1. 关键年份的气候 - 水文背景与政策时序

2009 年是本文湖泊总面积变化的重要低值年份。已有研究表明, 2009 年 10 月鄱阳湖淹没面积仅约 714.1 km² [17], 另有研究记录该年 7~9 月湖面仍维持较大范围, 但至 10 月底迅速缩小至约 738 km², 可能与降水偏少、气温偏高、空气湿度较低及蒸散增强等因素共同有关[18]。由于赣北大型湖泊及滨湖水系在全省湖泊面积中占据较高权重, 鄱阳湖快速退水可能显著拉低省域总面积。但上述数值针对鄱阳湖主体的单月水面, 本文统计的是全省面积大于 0.1 km² 的湖泊水体, 并以 8~10 月最大水体范围作为年度代表, 因此二者只能进行背景对照, 不能直接等同。

国务院于 2009 年批复《鄱阳湖生态经济区规划》[19], 构成了 2010 年以后区域湿地保护和生态政策变化的重要背景。与之相对, 2020 年湖泊总面积达到研究期高值。已有研究显示, 当年鄱阳湖流域发生严重洪水, 7 月至 10 月初淹没范围持续较大, 湖口站最高水位达到 22.49 m [20] [21]。因此, 本文 2020 年高值很可能部分保留了汛期丰水过程的信号, 不宜仅解释为长期生态恢复或政策治理成效。

4.2.2. 湖泊数量与面积差异及其区域机制

湖泊数量和总面积对气候及人文因素表现出不同相关关系, 可能主要源于统计阈值和面积权重差异。2020 年, 0.1~1 km² 湖泊共有 1985 个, 占全部湖泊数量的绝大多数, 但总面积仅为 532.39 km²; 大于 10 km² 的湖泊仅 29 个, 却贡献了 3382.85 km²。接近 0.1 km² 阈值的小型水体, 轻微的岸线移动、降水变化、蓄水调度或混合像元误差就可能使其跨越统计阈值, 从而显著改变湖泊数量, 但对全省总面积的影响有限。相反, 鄱阳湖等大型水体即使数量不变, 水位升降引起的岸线伸缩也会明显改变总面积。

水位变化还可能改变水体斑块的连接状态。低水位时, 连续水面可能被分割为多个斑块; 高水位时, 相邻斑块又可能重新连通。因此, 湖泊数量与面积并不是完全等价的水文响应指标。本文未对斑块分裂、合并及水库调度过程进行连续追踪, 以上解释应视为基于面积结构和遥感对象特征提出的可能机制。

这一认识与鄱阳湖已有研究总体一致。相关研究还表明, 鄱阳湖水面变化同时受五河来水、长江水位、湖口出流及人类活动影响[22]。因此, 本文中省域年降水量与湖泊总面积相关性不显著, 并不意味着降水作用较弱, 而可能说明省域年平均降水难以充分表征季节性来水和长江 - 鄱阳湖水力联系。与聚焦鄱阳湖主体的月尺度研究相比, 本文覆盖全省湖泊、水库和塘坝, 更适合揭示省域面积等级和区域分异, 两类研究在尺度和统计口径上具有互补性。

4.2.3. 研究局限性

本研究仍存在一定局限性。Landsat 影像空间分辨率为 30 m, 接近 0.1 km² 阈值的小型水体容易受到混合像元和边界识别误差影响。本文采用 8~10 月影像构建最大水体范围, 能够减少云覆盖和单景漏提取, 但不能完整反映全年及不同水文季节的湖泊变化。JRC 数据和人工校核提高了长时间序列的一致性, 但仍可能受到影像质量和解译经验影响。此外, Pearson 相关分析仅反映变量之间的同步变化关系, 不能区分降水、水位、水利调控、土地利用和政策实施的独立作用。因此, 本文对驱动机制的讨论主要是结

合统计关系、区域事件和既有研究提出的解释性认识。

参考文献

- [1] Lehner, B. and Döll, P. (2004) Development and Validation of a Global Database of Lakes, Reservoirs and Wetlands. *Journal of Hydrology*, **296**, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>
- [2] Ma, R., Duan, H., Hu, C., Feng, X., Li, A., Ju, W., *et al.* (2010) A Half-Century of Changes in China's Lakes: Global Warming or Human Influence? *Geophysical Research Letters*, **37**, L24106. <https://doi.org/10.1029/2010gl045514>
- [3] Tao, S., Fang, J., Ma, S., Cai, Q., Xiong, X., Tian, D., *et al.* (2020) Changes in China's Lakes: Climate and Human Impacts. *National Science Review*, **7**, 132-140. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz103>
- [4] 谢诗怡, 况润元, 宋子豪. 鄱阳湖水域面积变化特征及对气象因素的响应[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 103-109.
- [5] Wang, Y., Ma, J., Xiao, X., Wang, X., Dai, S. and Zhao, B. (2019) Long-Term Dynamic of Poyang Lake Surface Water: A Mapping Work Based on the Google Earth Engine Cloud Platform. *Remote Sensing*, **11**, Article 313. <https://doi.org/10.3390/rs11030313>
- [6] 2022 年中国水资源公报[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(7): 2.
- [7] Pekel, J., Cottam, A., Gorelick, N. and Belward, A.S. (2016) High-Resolution Mapping of Global Surface Water and Its Long-Term Changes. *Nature*, **540**, 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- [8] Deng, Y., Jiang, W., Tang, Z., Ling, Z. and Wu, Z. (2019) Long-Term Changes of Open-Surface Water Bodies in the Yangtze River Basin Based on the Google Earth Engine Cloud Platform. *Remote Sensing*, **11**, Article 2213. <https://doi.org/10.3390/rs11192213>
- [9] Xu, H. (2006) Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **27**, 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- [10] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [11] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. (2017) Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, **202**, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- [12] 李清梅. 江西省水资源承载力评价及影响因素分析[J]. 水利技术监督, 2024(3): 90-93.
- [13] 宋平, 刘元波, 刘燕春. 陆地水体参数的卫星遥感反演研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 731-740.
- [14] 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[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 189-195.
- [15] Mcfeeters, S.K. (1996) The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- [16] 杜云艳, 周成虎. 水体的遥感信息自动提取方法[J]. 遥感学报, 1998, 2(4): 364-369.
- [17] Feng, L., Hu, C., Chen, X., Cai, X., Tian, L. and Gan, W. (2012) Assessment of Inundation Changes of Poyang Lake Using MODIS Observations between 2000 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, **121**, 80-92. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.014>
- [18] Liu, Y., Song, P., Peng, J., Fu, Q. and Dou, C. (2011) Recent Increased Frequency of Drought Events in Poyang Lake Basin, China: Climate Change or Anthropogenic Effects? 99-104. https://iahs.info/uploads/dms/16769.20-99-104-344-27-Paper--286--NIGLAS_YLIU-IAHS-Melbourne-2011_sm.pdf
- [19] 中国经济周刊. 鄱阳湖生态经济区规划[EB/OL]. https://news.ifeng.com/mainland/200912/1216_17_1477277.shtml, 2009-12-16.
- [20] Yang, H., Wang, H., Lu, J., Zhou, Z., Feng, Q. and Wu, Y. (2021) Full Lifecycle Monitoring on Drought-Converted Catastrophic Flood Using Sentinel-1 SAR: A Case Study of Poyang Lake Region during Summer 2020. *Remote Sensing*, **13**, Article 3485. <https://doi.org/10.3390/rs13173485>
- [21] 姚仕明, 雷文韬, 渠庚, 等. 基于遥感影像的鄱阳湖 2020 年汛期灾情分析[J]. 人民长江, 2020, 51(12): 185-190.
- [22] Mei, X., Dai, Z., Du, J. and Chen, J. (2015) Linkage between Three Gorges Dam Impacts and the Dramatic Recessions in China's Largest Freshwater Lake, Poyang Lake. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 18197. <https://doi.org/10.1038/srep18197>