J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(1):000-000
DOI 10.18307/2027.0151
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

1980s 以来长江流域中下游河-湖-库-塘复合水域景观格局演变及驱动机制*

倪正炎[1]，李加林[1,2]，刘永超[1,2**]，方佳烨[1]，徐夏宣[1]，钟文雅[1]，殳天琦[1]
（1：宁波大学地理科学与遥感技术学院，宁波 315211）
（2：宁波大学陆海国土空间利用与治理浙江省协同创新中心，宁波 3152111）

摘　要：长江流域中下游河-湖-库-塘复合水域系统作为流域水文连通性与生态过程交互的核心载体，其多要素协同演化规律与驱动机制尚待深入揭示。现有研究多聚焦单一水域类型，难以系统解析复合系统内部组分的动态关联及多因子耦合效应。基于多源遥感影像生成的专题数据产品，本文综合运用景观格局分析方法与地理探测器模型，系统阐明了 1980s 以来长江中下游复合水域景观格局时空分异特征，并定量识别了自然与人为驱动因子的交互作用机制。结果表明：（1）研究期内复合水域景观总面积呈增加趋势，但内部结构分异显著；河渠、水库坑塘及滩地面积扩张，而湖泊、滩涂与沼泽湿地持续萎缩，凸显了人类活动对水域结构的深度改造。（2）复合水域景观组分间动态转换特征明显，前者表现为净转入，后者呈净转出，揭示了水域景观要素间的复杂权衡关系。（3）整体景观格局趋于破碎化与复杂化，表现为斑块数量（NP）、斑块密度（PD）、边界密度（ED）、景观形状指数（LSI）、香农多样性指数（SHDI）及均匀度指数（SHEI）持续上升，聚集度指数（AI）则呈下降趋势；不同类型水域景观指数响应存在显著差异，反映了其演化路径的分异。（4）复合水域景观演变受自然基础与人为扰动的交互驱动，其中气温与降水奠定了其区域格局，而人口密度变化率对湖泊萎缩、沼泽退化等过程影响尤为显著。本研究揭示了长江中下游复合水域系统的结构演化规律及驱动机制，可为流域水资源统筹管理、生态修复与国土空间规划提供科学依据。
关键词：河-湖-库-塘复合水域景观；时空变化；驱动因素；长江中下游流域

Landscape pattern evolution and driving mechanism of the river-lake-reservoir-pond composite water system in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin since 1980s*

Ni Zhengyan[1], Li Jialin[1,2], Liu Yongchao[1,2**], Fang Jiaye[1], Xu Xiaxuan[1], Zhong Wenya[1]&Shu Tianqi[1]
(1：*School of Geography and Remote Sensing, Ningbo University, Ningbo* 315211, *P.R.China*)
(2：*Zhejiang Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo University, Ningbo* 315211, *P.R.China*)

Abstract: The river-lake-reservoir-pond composite water system in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin serves as a key medium for the interaction between hydrological connectivity and ecological processes at the watershed scale. However, the coordinated evolution of its multiple water components and the underlying driving mechanisms remain poorly understood. Most previous studies have focused on individual water body types, limiting a systematic understanding of the internal interactions and combined effects of multiple drivers in this composite system. Using multi-source remote sensing thematic datasets, this study integrated landscape pattern analysis and the Geographical Detector model to examine the spatiotemporal differentiation of the composite water landscape. It also quantitatively distinguished the interactive effects of natural and anthropogenic drivers. The main findings are as follows. (1) The total area of the composite water landscape increased over the study period, accompanied by notable structural changes. Rivers, artificial

* 2025-11-29 收稿;2026-03-13 收修改稿;2026-05-08 录用。
国家社会科学基金重大项目(23&ZD105)资助。
**通信作者，E-mail：liuyongchao@nbu.edu.cn

channels, reservoirs, ponds, and shoals expanded continuously, while natural lakes, tidal flats, and marsh wetlands decreased steadily, indicating that human activities have dominated the structural reorganization of the regional water system. (2) Frequent landscape conversions occurred among different water components. Opposite net area changes were observed for various water landscape types, reflecting complex trade-off relationships among aquatic landscape elements. (3) The overall water landscape pattern became more fragmented and irregular. Patch number (NP), patch density (PD), edge density (ED), landscape shape index (LSI), Shannon's diversity index (SHDI), and Shannon's evenness index (SHEI) all increased, whereas the aggregation index (AI) decreased gradually. Different water body types exhibited heterogeneous responses in landscape metrics, confirming distinct evolutionary trajectories among water patches. (4) Both natural background conditions and human disturbances jointly shaped the evolution of the composite water landscape. Regional temperature and precipitation determined the basic spatial pattern of water landscapes, while population density was the dominant factor driving key degradation processes such as lake area shrinkage and marsh wetland loss. This study clarifies the structural evolution characteristics and driving mechanisms of the Yangtze river-lake-reservoir-pond composite water system, and provides scientific support for integrated watershed water resource management, aquatic ecological restoration, and territorial spatial optimization in the basin.

Keywords: River-lake-reservoir-pond composite water landscape; spatio-temporal variation; driving forces; middle and lower reaches of the yangtze river basin

景观作为地球表层系统的核心构成单元，是地貌、水文、生物、气候与人类活动多要素交互作用的产物，集中体现了复杂的人地关系[1]。其中，水体不仅是塑造地表形态的关键外营力，更是联结地球表层各圈层的重要纽带与维持生命系统的基础介质[2-3]。以水体为核心，耦合滨岸空间、生物群落与人类活动而形成的水域景观，构成了水陆交错带这一典型过渡性地理单元[4]。因其独特的流动性、连通性与生态敏感性，水域景观在系统结构与功能特征上显著区别于一般景观类型，已成为地球表层科学及人地关系研究的重要样带[5-6]。

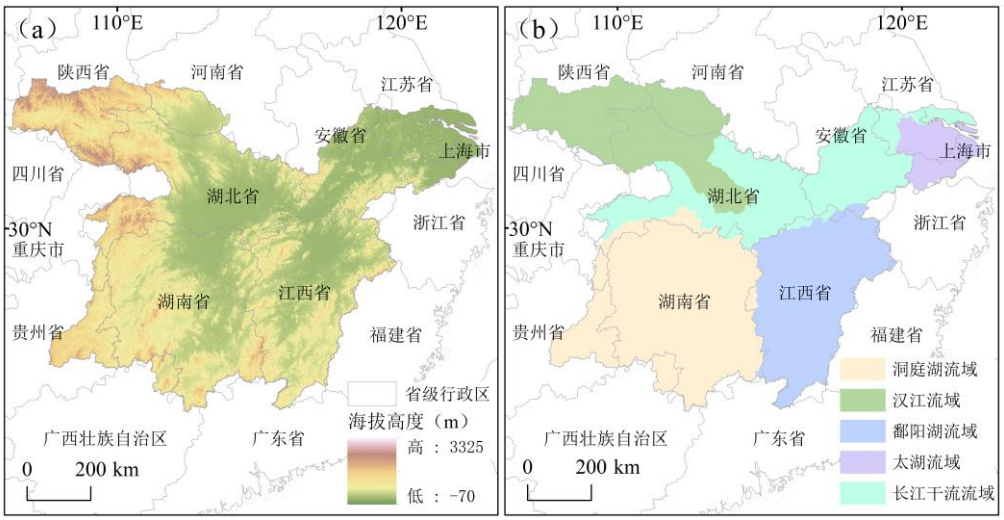
在大江大河下游冲积平原，自然河道、湖泊、人工坑塘、水库及湿地等多类型水体呈高密度分布且彼此连通，形成结构复杂的河-湖-库-塘复合水域系统。该系统涵盖从流水到静水的连续生态梯度，通过水文过程与生态过程的耦合，维系着区域洪水调蓄、水资源配置与生物栖息地维护等核心生态系统服务功能。然而，在快速城市化、气候变化与高强度人类活动叠加影响下，围湖造田、湿地侵占与水体污染等行为导致水域景观破碎化、面积萎缩及功能退化等问题日益凸显[7]，亟需从系统视角深入解析复合水域景观的演变机理。随着地理信息技术的进步，多源遥感影像已成为监测河渠[8]、湖泊[9-10]、水库坑塘[11]、滩涂[12]、湿地[13-15]等水体景观长期动态的核心技术手段。现有研究虽已认识到水域资源对区域可持续发展的支撑作用[16-17]，但研究对象多聚焦于单一水体类型（如湖泊或湿地），缺乏对“河-湖-库-塘”复合水域系统整体演变规律的系统性探讨，尤其未能揭示不同类型水体之间因水文连通性与生态过程耦合所形成的网络化结构特征。其次，驱动机制分析多侧重于单一因素的评估，例如湖泊围垦对湖泊萎缩的影响[18]、气温降水对湖泊水色的作用[19]、土地利用强度对湿地演变的驱动[16]，而对多维度驱动因子间的交互作用及其耦合机制的系统性解析仍显薄弱。此外，虽有研究从景观生态学视角探讨了复合水域系统的动态演变及其生态效应，涉及景观生态安全[20-21]、河湖连通性[22]及蓝绿网络结构[23]等方面，但其尺度多集中于中小区域[24-25]，针对跨省域大尺度复合水域景观格局的综合研究仍显不足。因此，当前在复合水域系统整体性演变规律、多要素耦合驱动机制及大尺度空间格局等方面，尚有待系统性地深入探究。

长江中下游流域作为我国浅水湖泊分布最集中、水域系统最典型的区域，其以长江干流为骨架、洞庭湖与鄱阳湖等大型湖泊为主体、水库湿地及坑塘为补充的复合水域系统，生态敏感性与人地矛盾均十分突出，是开展上述研究的理想案例区。鉴于此，本文基于 1980-2020 年 8 期土地利用数据，运用景观格局分析与地理探测器等方法，系统解析长江中下游流域河-湖-库-塘复合水域系统的景观格局动态及其自然与人为耦合驱动机制，以期为复合水域系统大尺度综合研究及区域生态修复与生态安全格局构建提供科学依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区

长江中下游流域指湖北宜昌以东的长江干流及其支流所覆盖的广大区域（图 1），地跨陕西、河南、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、浙江、上海等省（市），总面积约 80.2 万 km²，约占长江流域总面积的 44.4%。依据水系分布格局与区域地理特征，该流域可划分为汉江、洞庭湖、长江干流、鄱阳湖及太湖五大主要子流域。流域属典型亚热带季风气候，雨热同期，降水丰沛，水文过程受季风降水和上游来水双重调控，季节性波动特征显著。流域内水网密布、湖泊众多，孕育了中华鲟、长江江豚等珍稀水生生物，湿地植被、水生生物与水陆交错带群落交织共生，构成独具特色的复合水域生态系统。



基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2019)1822 号标准地图制作，底图边界无修改。

图 1 长江中下游流域概况（a）海拔高度图；（b）流域范围图

Fig.1 Overview of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

1.2 数据及来源

本研究采用的土地利用数据源自中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）提供的 1980-2020 年共 8 期土地利用遥感解译数据集。该数据集以 Landsat 系列卫星影像为主要信息源，采用人工目视解译方法构建，空间分辨率为 30 m，分类体系涵盖 6 个一级类型和 25 个二级类型。为聚焦研究目标，本文重点提取其中水域类型（河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂与滩地）及未利用地中的沼泽地作为分析对象。数据在生产过程中，针对中国南北方的物候差异，北方区域优先选用秋季影像、南方区域优先选用春季影像，以最大程度降低季节波动对地类判读的干扰。数据质量通过全国范围内 10%县数的野外实地抽样验证与跨时段一致性校准进行控制，总体解译精度达 90%以上[26-27]。经过 30 年持续更新与多轮精度优化，该数据集的时空完整性与一致性已在多尺度土地利用变化研究中得到广泛验证[27]，能为本研究提供可靠的数据支撑。

本研究涉及的气象数据（包括降水量与气温）源自中国气象数据网（http://data.cma.cn），蒸散量数据获取自国家青藏高原科学数据中心（http://data.tpdc.ac.cn）。数字高程模型（DEM）数据由地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn）提供。社会经济数据（人口密度与国内生产总值）来源于中国科学院资源环境科学数据中心。为保障空间分析的一致性，所有数据均以 2009 年长江中下游流域边界为基准进行统一配准，该边界矢量数据由国家基础地理信息中心（https://ngcc.cn）提供；行政区划边界数据则基于全国地理信息资源目录服务系统（https://www.webmap.cn）获取。

2 研究方法

2.1 河-湖-库-塘复合水域景观类型划分

为系统探究水域景观的时空动态特征，本研究依据 GB/T21010-2017《土地利用现状分类》中湿地的划分标准，结合区域湿地分布实际与研究目标，选取土地利用数据中以天然水体与人工水面为主的水域景观类型，以及未利用地类作为研究对象。具体涵盖河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂与滩地等水域二级类型，以及沼泽地等未利用地二级类型。

2.2 河-湖-库-塘复合水域景观面积动态变化与水面率

基于 1980—2020 年间多期土地利用数据，提取研究区水域空间分布信息，并借助土地利用转移矩阵解析水域景观类型的转化规律。水面率定义为区域水域面积与总面积的比值，是刻画水域空间格局及其动态变化的重要指标，亦可用于表征人类活动对水资源系统的干预程度以及区域生态功能的承载水平[28]。其计算公式如下：

$$R=\frac{A_W}{A_L}\times 100\% \tag{1}$$

其中，R 为区域水域景观水面率，A_W为区域水域景观（河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地、沼泽地）的总面积，A_L为区域总面积。

2.3 基于景观指数的河-湖-库-塘复合水域景观空间格局分析

景观格局指数能够定量表征景观结构的组成特征与空间配置关系，是揭示景观格局演变规律的重要分析工具。本研究基于景观生态学原理，运用景观格局指数方法，对长江中下游流域河-湖-库-塘复合水域景观格局特征进行量化分析。在参考已有研究成果的基础上[29-30]，选取 9 项景观水平指数与 8 项类型水平指数（表 1），从破碎化程度、空间连通性、斑块聚集度及景观异质性等维度，系统刻画复合水域景观的结构特征与演变规律。

2.4 人为与自然耦合驱动机制分析方法

长江中下游河-湖-库-塘复合水域景观演变由自然因素与人类活动的共同驱动。本研究采用地理探测器方法，重点运用因子探测器和交互探测器，以定量解析水域景观演变的驱动机制[31]。

（1）因子探测器。用于量化自变量（X）对因变量（Y）空间分异的解释力，通过计算 q 值衡量 X 与 Y 的空间关联性。若 X 的分层特征显著影响 Y 的空间分布，则 q 值越高，表明 X 对 Y 的解释能力越强，反之则越弱。其计算公式如下：

$$\begin{aligned} q &= 1-\frac{\sum_{h=1}^{l} N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1-\frac{SSW}{SST} \\ SSW &= \sum_{h=1}^{l} N_h\sigma_h^2,\ \ SST = N\sigma^2 \end{aligned} \tag{2}$$

式中，q 为驱动因子 Y 的解释力，取值区间[0，1]，值越大表明该因子对 Y 的空间分异影响越显著；SWW 与 SST 分别表示层内方差之和与全区总方差；σ^2与σ_h^2分别为层 h 和全区的 Y 值方差；N_h与 N 分别为层 h 和全区的样本单元数。

（2）交互探测器。用于识别不同驱动因子的交互作用，判定两因子共同作用时是否会增加或减弱对因变量的解释力，或这些因子对其影响是否相互独立。

（3）驱动因素选取。基于研究区域特征及数据可获得性，结合既有研究成果[32]，选取高程（$X1$）、坡度（$X2$）、多年平均降水（$X3$）、多年平均温度（$X4$）、多年平均蒸散量（$X5$）5 项自然因子，以及 GDP（$X6$）、人口密度（$X7$）2 项社会经济因子，作为长江中下游河-湖-库-塘复合水域景观面积变化的驱动因素。本研究以 1980－2020 年河-湖-库-塘复合水域景观下 5 类地物（河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地）及未利用地中沼泽地的面积变化量作为因变量（Y），以上述 7 项自然与社会经济因子作为自变量（$X1$-$X7$）。其中，社会经济因子（人口密度、GDP）在研究时段内变幅显著，故采用其年际变化率作为自变量；而自然因子相对稳定，且气象数据均采用多年平均值，因此未进行变化率计算。

表 1 景观格局指数

Tab.1 Landscape pattern index

景观格局指数（缩写）	计算公式	生态学意义
斑块数量（NP）	$S_1 = N$	景观中所有斑块的总数。
斑块密度（PD）	$S_2 = N/A \times 10^6$	单位面积上总的斑块数。
最大斑块指数（LPI）	$S_3 = \frac{\max a_{ij}}{A} \times 100\%$	某一景观类型中最大斑块所占面积的比重，识别景观中的主要类型。
边界密度（ED）	$S_4 = E / A$	景观中斑块边缘总长度与总面积之比，衡量景观边缘复杂度，其值越高，景观边缘的复杂性越大。
景观形态指数（LSI）	$S_5 = \frac{e_i}{\min e_i}$	斑块形状的复杂性，值越接近 1，斑块形状越规则。
连通度（COHESION）	$S_6 = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} P_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} P_{ij}\sqrt{a_{ij}}}\right)\left(1 - \frac{1}{\sqrt{A}}\right)^{-1} \times 100\%$	斑块在景观中的连接程度。
聚集度（AI）	$S_7 = \sum_{i=1}^{m}\left(\frac{g_{ii}}{\max g_{ii}}\right) p_i \times 100\%$	衡量景观内部同类斑块的集中度，指数越高，同类斑块的聚集趋势越明显。
斑块面积百分比（PLAND）	$S_8 = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{A} \times 100$	评估某景观类型的相对重要性，其值越高，表明该类型斑块在景观中占据主导地位。
香农多样性指数（SHDI）	$S_9 = -\sum_{i=1}^{m}\left(p_i \ln p_i\right)$	反映景观异质性，其值越高，景观中生态系统组成越复杂。
香农均匀度指数（SHEI）	$S_{10} = \frac{-\sum_{i=1}^{m}(P_i \times \ln P_i)}{\ln m}$ ）	景观中各个斑块类型的均匀分布程度，其值越高，表明分布相对均衡、景观结构更加稳定、生态系统功能更加健康。

（4）数据处理。为使不同时空尺度的土地利用数据、地形数据和社会经济数据等数据在空间上具有一致性，将所有数据的投影统一更改为 Krasovsky_1940_Albers，所有数据的栅格大小统一为 1km×1km。将各水域景观变化面积作为因变量，并对各自变量对其分级处理，利用 ArcGIS10.8 软件将自变量采用自然断点法进行离散化操作（赋值为 1、2、3、4、5 五个等级），以统计 7 个指标与长江中下游流域水域景观面积变化间的显著性水平与解释力。

3 结果与分析

3.1 河-湖-库-塘复合水域景观面积动态变化

长江中下游流域水系发达，河网密布，湖泊与沼泽广布（图 2）。1980—2020 年间，河-湖-库-塘复合水域景观面积总体呈增长态势，水域面积由 35630.15 km^2 增至 40357.30 km^2，40 年间净增 4727.15 km^2。但不同类型水体面积变化差异显著（表 2）：湖泊、滩涂与沼泽地为萎缩型地类，面积分别减少 665.34 km^2、18 km^2 与 334.88 km^2。其中滩涂萎缩最为剧烈，减少幅度达 54.74%，其动态变化与围垦、港口建设、养殖等活动对自然潮间带的占用联系密切。相比之下，水库坑塘、河渠与滩地为扩张型地类，面积分别增长 3984.14、1179.87 与 581.36 km^2。其中水库坑塘净增面积对长江中下游流域整体水面率增长贡献最大，构成区域水面率上升的主要驱动力，反映出水域系统结构的显著演变。水面率变化过程呈现显著的非线性特征，并表现出阶段性波动规律（图 4）。整体而言，流域水面率由 1980 年的 4.44%增至 2020 年的 5.03%，呈波动上升趋势，表明区域水域面积总体有所增加，水域保护取得一定成效。然而，不同时段变化态势存在差异：1980—1990 年与 1995—2015 年水面率呈上升态势，其余时段则呈下降态势，反映出复合水域系统演变的阶段性与复杂性。

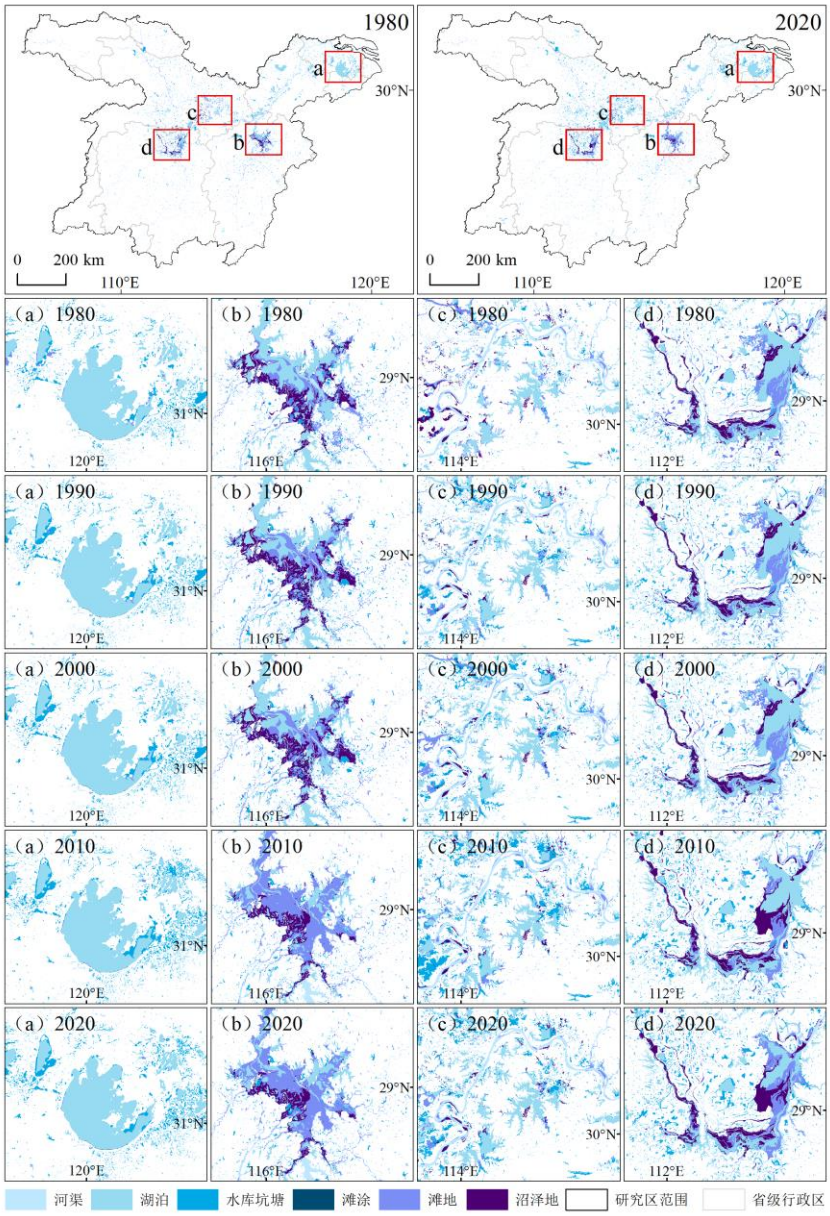


图 2 长江中下游河-湖-库-塘复合水域景观时空分布

Fig 2 Spatio-temporal distribution of the river-lake-reservoir-pond complex water landscape

在子流域尺度上，水域面积变化表现出显著的空间异质性（图 3、表 3）。汉江流域作为南水北调中线工程的核心水源区，水域面积较 1980 年增加 1209.76 km²，增幅达 37.10%，为流域内增幅最大。太湖流域属高度人工化的平原河网区[33]，水域面积增加 567 km²，水面率由 11.79%升至 13.31%，居各子流域之首。受三峡工程运行影响，长江干流及洞庭湖、鄱阳湖流域水文情势发生显著改变[34-36]，2003 年后上述区域水面率变化趋于稳定。其中，鄱阳湖流域水面率由 4.82%升至 4.87%，水域面积净增 70 km²，增幅仅 0.98%，为流域内增幅最小，反映出大型水利工程对下游通江湖泊水域变化的调控效应。

表 2 长江中下游河-湖-库-塘复合水域景观面积变化

Tab. 2 Changes in the landscape area of the river-lake-reservoir-pond complex water area

水域类型	面积/ km²								2020 年较 1980 年面积变化/ km²
	1980 年	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	
河渠	8121.16	8075.52	7919.46	8037.46	8101.86	9200.10	9287.49	9301.02	1179.87
湖泊	12189.13	12704.08	13077.91	12595.02	13687.47	11442.65	12083.18	11523.79	-665.34
水库坑塘	7777.01	9852.23	9896.54	10363.35	11336.27	12298.62	12375.92	11761.14	3984.14
滩涂	32.88	38.96	36.64	37.10	31.54	28.91	23.35	14.88	-18.00
滩地	5349.36	4963.12	4526.95	5300.70	4578.04	5947.60	5269.40	5930.72	581.36
沼泽地	2160.62	1954.28	1903.30	2017.81	1682.61	1838.61	1817.29	1825.74	-334.88

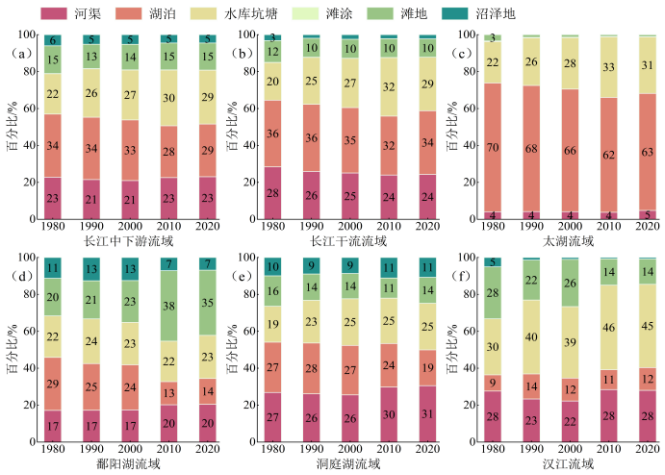


图 3 长江中下游子流域水域景观占比变化

Fig 3 Changes in the proportion of water landscape in the sub-basins

3.2 河-湖-库-塘复合水域景观时空转换特征

1980—2020 年间，长江中下游流域水域景观格局呈现出显著的动态转换特征（表 4）。总体表现为水域转入面积大于转出面积，反映该流域内部分非水域地类逐步转化为水域地类。在不同水域类型中，转换方向与强度存在明显差异：湖泊、滩涂与沼泽地总体表现为净转出，而河渠、水库坑塘及滩地则以净转入为主。该格局揭示出自然水体趋于萎缩与人工水域持续扩张并存的演变态势。1980—2020 年间，长江中下游流域水域景观格局发生显著演变，景观类型间转化路径共计 92 种（图 5）。其中，耕地转为水库坑塘是最主要的转化类型，面积达 4321.79 km²。该变化既反映了农业结构转型中农田向养殖水体的功能转变，也体现了为强化灌溉、供水与防洪能力而实施的水利工程建设。湖泊向滩地的转化，揭示了围湖造田与城市化等人类活动对湖泊水域的侵占效应。同期，受排水疏干与围垦开发影响，沼泽湿地出现明显退化，并大面积转为滩地。值得关注的是，河渠与滩地之间存在显著的双向转化特征，可能源于水利工程调度或季节性水文波动，反映出河渠系统的不稳定性。与耕地→水库坑塘转化方向相反，水库坑塘向耕地的逆转，或受到国家粮食安全战略下“退渔还耕”与“退塘还田”等政策驱动，亦可能因部分水体功能退化，导致土地重新恢复为农业利用。

各子流域的地类转换路径呈现出显著的空间异质性。鄱阳湖与洞庭湖流域以湖泊向河渠、滩地与沼泽地的转换为主，并伴随滩地向河渠与水库坑塘的转变，反映出通江湖泊在水利工程调控及围垦活动影响下出现的沼泽化与旱化过程。太湖流域的地类转换格局具有明显区域差异：太湖周边区域主要表现为坑塘还湖或复垦为耕地；而石臼湖、南漪湖周边则呈现耕地或滩地向水库坑塘的转换特征。在汉江及长江干流流域，人类活动依托地形条件实施水利开发，显著改变了水域结构，主要表现为耕地转为水库坑塘，以及滩地向河渠、湖泊与水库坑塘的转换。总体而言，1980—2020 年间长江中下游地区水域总面积虽呈净增加趋

势，但其结构演变主要表现为人工水域持续扩张，自然水域趋于萎缩与形态复杂化，整体水域功能亦逐步由自然调节向人工调控转变。

表 3 长江中下游子流域景观面积变化

Tab.3 Changes in the landscape area of the sub-basins

年份	类型	长江中下游流域	长江干流流域	太湖流域	鄱阳湖流域	洞庭湖流域	汉江流域
1980	水域面积/ km^2	35630.15	12941.88	4394.87	7148.47	7739.79	3240.80
	水面率/ %	4.44	4.26	11.79	4.82	3.23	2.21
1990	水域面积/ km^2	37588.18	13953.33	4531.99	7208.20	7984.49	3764.90
	水面率/ %	4.69	4.59	12.16	4.86	3.33	2.57
1995	水域面积/ km^2	37360.80	13943.34	4602.12	6806.75	8118.47	3732.94
	水面率/ %	4.66	4.58	12.34	4.59	3.39	2.55
2000	水域面积/ km^2	38351.44	14228.80	4668.91	7246.15	8225.18	3822.12
	水面率/ %	4.78	4.68	12.52	4.89	3.43	2.61
2005	水域面积/ km^2	39417.78	14779.68	4821.16	7158.89	8375.50	4125.08
	水面率/ %	4.91	4.86	12.93	4.83	3.50	2.81
2010	水域面积/ km^2	40756.49	15335.93	5034.86	7176.32	8563.41	4491.53
	水面率/ %	5.08	5.04	13.51	4.84	3.58	3.06
2015	水域面积/ km^2	40856.64	15357.46	5030.81	7173.48	8592.98	4552.65
	水面率/ %	5.09	5.05	13.49	4.84	3.59	3.10
2020	水域面积/ km^2	40357.30	14805.13	4962.12	7218.27	8761.71	4450.56
	水面率/ %	5.03	4.87	13.31	4.87	3.66	3.03
40 年变化	水域面积/ km^2	4727.15	1863.25	567.25	69.80	1021.92	1209.76
	水面率/ %	0.59	0.61	1.52	0.05	0.43	0.82

表 4 长江中下游河-湖-库-塘复合水域景观类型转换面积(km^2)统计

Tab.4 Statistics on the area of landscape type transformation of river-lake-reservoir-pond complex water areas ($km^{2)}$

时间段	转换方向	河渠	湖泊	水库坑塘	滩涂	滩地	沼泽地
1980-1990 年	转入	305.73	1096.17	2297.59	11.75	1066.99	226.48
	转出	351.38	581.22	222.32	5.67	1453.15	432.47
1990-1995 年	转入	272.74	893.91	1106.66	2.54	583.62	63.86
	转出	428.53	519.80	1061.40	4.87	1019.20	115.08
1995-2000 年	转入	403.61	449.11	1225.37	1.60	1338.53	184.50
	转出	285.90	932.35	759.63	1.14	565.40	69.83
2000-2005 年	转入	268.04	1245.02	1538.84	0.49	371.54	66.98
	转出	203.70	152.80	565.97	6.05	1094.24	402.25
2005-2010 年	转入	1688.07	789.08	2629.86	0.22	2873.46	527.64
	转出	589.93	3033.91	1667.63	2.93	1503.93	371.65
2010-2015 年	转入	210.14	985.93	491.73	1.39	471.29	8.87
	转出	122.51	345.34	414.45	6.95	1149.46	30.02
2015-2020 年	转入	1019.04	850.43	2025.17	3.10	1628.42	140.74
	转出	1004.97	1409.88	2641.74	13.55	967.13	132.63
1980-2020 年	转入	2360.69	1785.04	5983.68	5.00	3439.11	699.46
	转出	1180.09	2450.42	2001.61	24.93	2857.68	1035.00

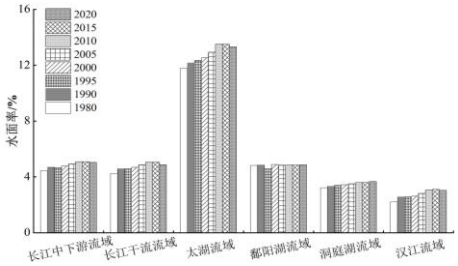


图 4 长江中下游河-湖-库-塘复合水域景观水面率

Fig 4 Water surface rate of the river-lake-reservoir-pond complex water area landscape

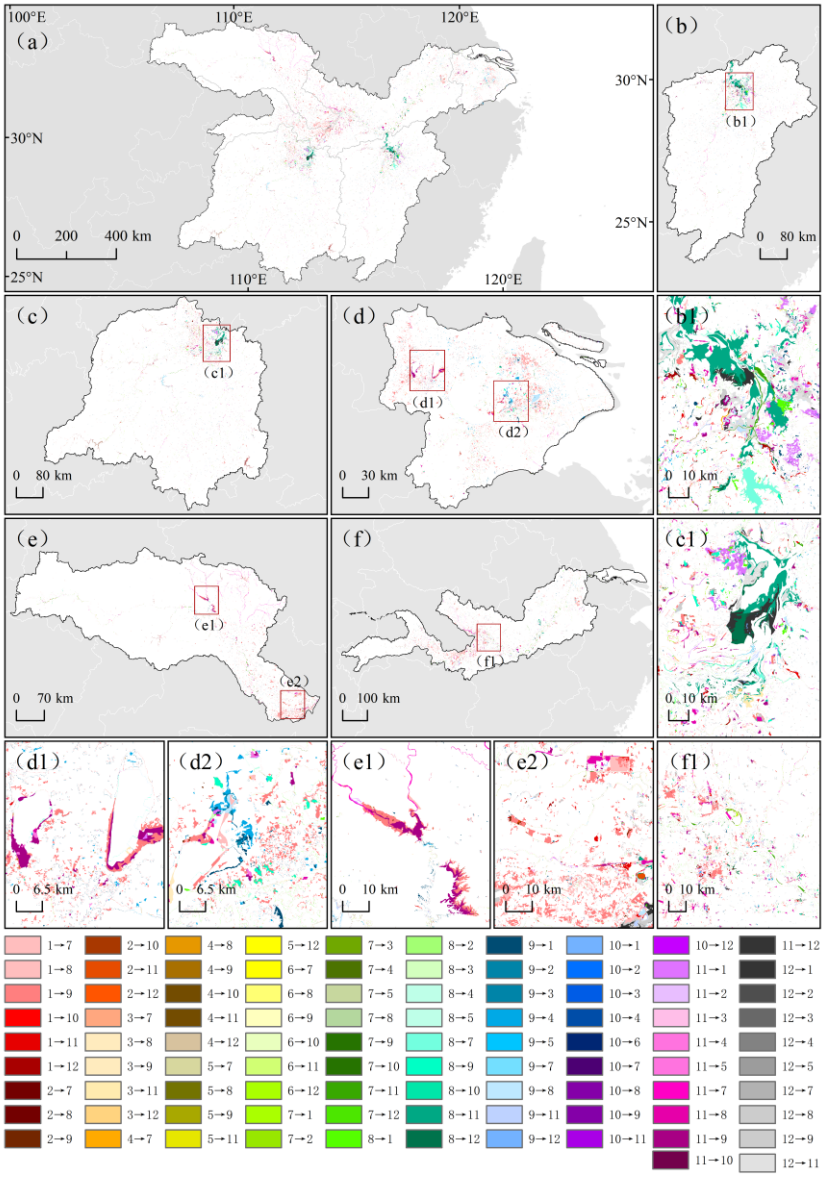


图 5 1980—2020 年长江中下游河-湖-库-塘复合水域景观类型转换空间分布（1 耕地，2 林地，3 草地，4 城乡、工矿、居民用地，5 未利用地，6 海洋，7 河渠，8 湖泊，9 水库坑塘，10 滩涂，11 滩地，12 沼泽地）

Fig.5 Spatial distribution of landscape type transformation of river-lake-reservoir-pond complex water areas

3.3 河-湖-库-塘复合水域景观格局动态变化

3.3.1 景观水平上的景观格局演变特征　景观水平指数分析结果揭示了 1980—2020 年研究区水域景观格局在破碎化、形态及异质性三个维度的演化特征（表 5）。 研究期内，斑块数量（NP）由 553048 个增至 602575 个，斑块密度（PD）同步波动上升，表明区域水域景观破碎化程度持续加剧。最大斑块指数（LPI）在 1980—2015 年间呈波动下降趋势，于 2020 年骤升至 12.21%，该突变反映出水域斑块优势度格局的结构性转变，即由相对分散分布向局部高度集聚转变，推测与重大水利工程蓄水或大型水域扩张事件有关。值得注意的是，斑块结合度（COHESION）始终维持在 99.92~99.95 的超高水平，表明流域天然河网与水利工程的协同作用有效维系了水域景观的整体水文连通性，并未因局部斑块破碎化而显著衰减。从形态复杂度看，边缘密度（ED）与景观形状指数（LSI）呈波动上升态势，尤以 2015 年后增速加快，反映水域斑块边界日趋曲折，斑块与基质交互作用增强。这一变化与自然岸线的人工改造（如硬化护坡、河道裁弯取直）等人类活动密切相关。然而，聚集度指数（AI）仅从 95.80%小幅降至 95.33%，说明局部斑块的集聚并未有效提升景观整体的聚集程度，水域空间格局仍呈现总体离散的破碎化特征。从景观异质性看，香农多样性指数（SHDI）及均匀度指数（SHEI）呈缓慢上升态势。这种变化揭示了一种结构性的权衡，即在湖泊、沼泽等自然水域萎缩，水库、坑塘等人工水域扩张的背景下，不同类型水域景观面积趋于均衡，导致景观类型异质性提升。SHEI 指数虽仅微增 0.3%，却展示了自然水域主导地位的弱化，区域生态系统服务功能仍面临退化风险。

表 5 景观水平指数

Tab.5 Landscape level index

年份	景观指数								
	NP	PD	LPI	ED	LSI	COHESION	SHDI	SHEI	AI
1980	553048	0.69	5.99	27.97	628.31	99.94	1.21	0.49	95.80
1990	555055	0.70	4.58	28.20	633.70	99.93	1.22	0.51	95.76
1995	532675	0.67	4.68	28.51	641.66	99.94	1.23	0.51	95.71
2000	556116	0.70	4.57	28.42	638.54	99.93	1.24	0.52	95.73
2005	538709	0.67	4.59	29.06	652.68	99.93	1.25	0.52	95.64
2010	546070	0.68	4.63	29.07	652.62	99.93	1.27	0.51	95.64
2015	576565	0.72	4.62	28.97	650.59	99.92	1.28	0.53	95.65
2020	602575	0.75	12.21	31.09	698.18	99.95	1.29	0.52	95.33

3.3.2 类型水平上的景观格局演变特征　景观类型尺度的格局指数分析表明（图 6），1980—2020 年间长江中下游流域各水域景观类型呈现显著分异的演变轨迹，反映了自然过程与人类活动的复合扰动效应。水库坑塘的 NP、PD、ED 与 LSI 指数持续上升，表明其景观形态趋于破碎化与边界复杂化，反映出人工坑塘开发强度的增加与空间分布的零散化趋势。值得注意的是，其 COHESION 指数始终维持在 97 以上，AI 指数虽略有波动但整体稳定，表明其在整体破碎化背景下仍呈现局部空间集聚特征，体现了人工水域建设的系统性与规模化导向。作为区域关键的生态廊道，河渠的 NP、ED 与 LSI 指数呈上升态势，表明其边界复杂性与形态不规则性加剧。尽管 LPI 指数仍保持相对优势，但该指数的阶段性波动，以及 COHESION 与 AI 指数的小幅度下降，揭示了河渠生态连通性存在不稳定性，可能削弱其作为物质流、能量流与物种流通道的生态功能。湖泊景观的 NP、PD、ED 与 LSI 指数呈稳中有升态势，表明湖泊边界受围垦与开发活动影响趋于复杂，破碎化程度有所提升。然而，其 COHESION 指数始终维持在 99.6 以上，AI 指数亦保持相对稳定，表明湖泊主体水域仍保持较高的空间连通性与聚集度，生态功能虽面临退化风险，但尚未对整体结构完整性造成显著冲击。滩地景观的 NP 与 PLAND 指数呈波动上升，但 ED 与 LSI 指数呈现阶段性起伏，表明滩地景观形态处于持续动态调整之中，反映了水沙过程变化与人类干预（如采砂、围垦）的复合影响。滩涂景观的 LPI 与 AI 指数呈阶段性下降，COHESION 指数波动变化，其余指数均处于较低水平，表明在沿海高强度开发背景下，滩涂景观呈现面积萎缩、空间连通性与聚集度减弱趋势，生态系统退

化风险加剧。沼泽地景观的 COHESION 与 AI 指数虽维持在较高水平，表明残留斑块仍具一定内部连通性，但其 NP、PD、LPI 等指数均处于较低水平，反映出该类景观分布范围显著缩减、斑块形态趋于简单、生态功能整体弱化的演变态势。

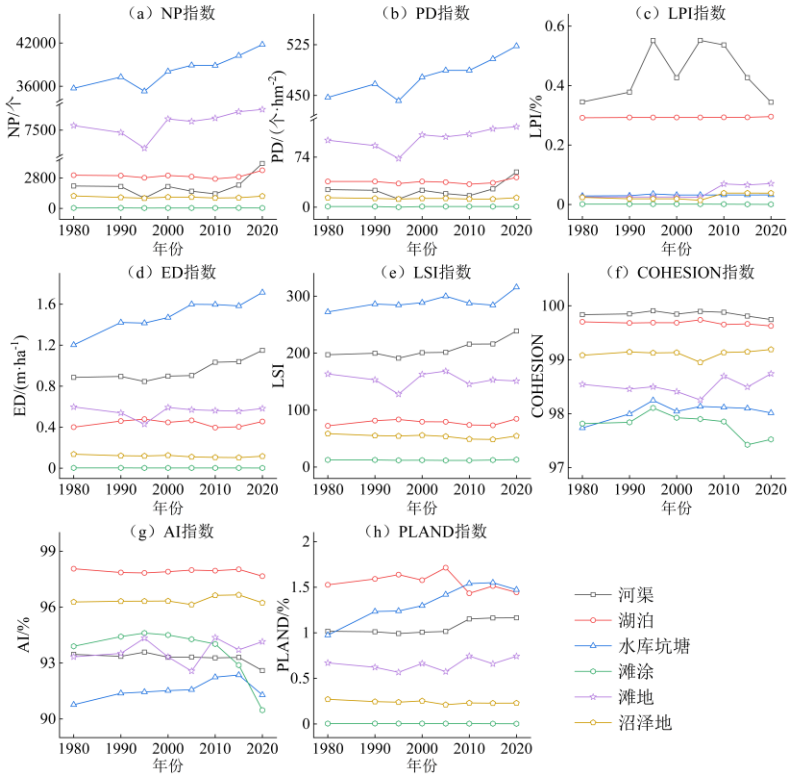


图 6 景观类型水平指数

Fig 6 Landscape type level index

3.4 人为与自然耦合的驱动因子探析

3.4.1 影响因子探测分析　地理探测器的因子分析结果显示（表 6），自然因子对水域景观变化的解释力普遍高于社会经济因子，表明气候与地形要素构成区域水域格局演变的自然本底。具体而言，多年平均降水量与蒸散量对河渠、湖泊、水库坑塘、滩地及沼泽等类型均表现出较强的解释力，从机理上揭示出区域水热平衡所主导的水文过程是水域系统演变的核心驱动因素。在自然本底基础上，人类活动的影响呈现出显著的类型分异特征。湖泊与沼泽作为生态敏感水体，其变化还受到人口密度变化率的显著驱动，反映出围垦、排水等人类干预活动对自然水域系统的直接作用。水库坑塘作为人工水域类型，其空间分布受坡度因子显著约束，体现了地形条件对人工水体选址与功能布局的调控作用。相比之下，滩地的变化未识别出显著的单一主导因子，表明其动态演变更多受河口泥沙输移、潮汐动力等局地微观过程控制，难以在流域尺度由宏观因子完整解释。此外，GDP 变化率对所有水域类型的影响均未达到显著水平，说明经济增长并非直接驱动水域变化，其影响更可能通过具体的土地利用方式与资源配置政策等间接路径实现。

3.4.2 驱动因子交互作用探测分析　交互作用分析结果表明（图 7），不同驱动因子组合对水域变化的影响多呈现非线性增强特征，进一步揭示长江中下游水域系统演变受多因子协同驱动的本质。河渠变化虽以自然因子为主导，但多年平均蒸散量与 GDP 变化率、多年平均蒸散量与人口密度变化率等交互作用均表现出增强效应，反映在气候背景条件下，人口增长与经济发展所引致的用水需求增加及水利工程建设对河渠形态与结构的调控作用。湖泊变化受多年平均降水量与蒸散量、以及多年平均降水量与人口密度变化率交互作用的影响最为显著，揭示天然水文过程与人类用水行为共同驱动湖泊水域动态的复合机制。水库坑

塘的扩张主要受多年平均降水量与蒸散量等自然因子间协同作用控制，表明其作为人工调控水体仍显著依赖区域天然水资源禀赋。滩涂变化受人口密度变化率与多年平均蒸散量等社会—自然复合因子影响，反映在自然蒸发条件下人类开发活动对滩涂资源利用的干预作用。沼泽与滩地的变化则体现出降水过程分别与温度或人口因子的协同控制，指示气候背景与人类活动在不同生态功能水域中具有差异化的耦合路径。综上，长江中下游地区不同类型水域景观的演变机制呈现显著的空间异质性，反映了自然环境要素与人类活动在不同地理背景下形成的复杂耦合关系。

表 6 驱动因子探测结果

Tabl.6 Driver factor detection results

驱动	河渠		湖泊		水库坑塘		滩涂		滩地		沼泽地	
因素	*q* 值	*p* 值	*q* 值	*p* 值	*q* 值	*p* 值	*q* 值	*p* 值	*q* 值	*p* 值	*q* 值	*p* 值
高程	0.008	0.000	0.000	0.588	0.003	0.000	0.088	0.503	0.003	0.000	0.001	0.608
坡度	0.003	0.000	0.001	0.017	0.004	0.000	0.003	0.781	0.004	0.000	0.000	0.381
多年平均降水	0.005	0.000	0.053	0.000	0.015	0.000	0.003	0.781	0.060	0.000	0.027	0.000
多年平均温度	0.001	0.176	0.003	0.000	0.000	0.365	0.006	0.917	0.013	0.000	0.001	0.662
多年平均蒸散量	0.013	0.000	0.005	0.000	0.003	0.000	0.222	0.439	0.050	0.000	0.014	0.000
人口密度变化率	0.001	0.028	0.008	0.000	0.001	0.027	0.029	0.854	0.001	0.372	0.007	0.000
GDP 变化率	0.003	0.000	0.001	0.017	0.001	0.021	0.094	0.640	0.005	0.000	0.006	0.000

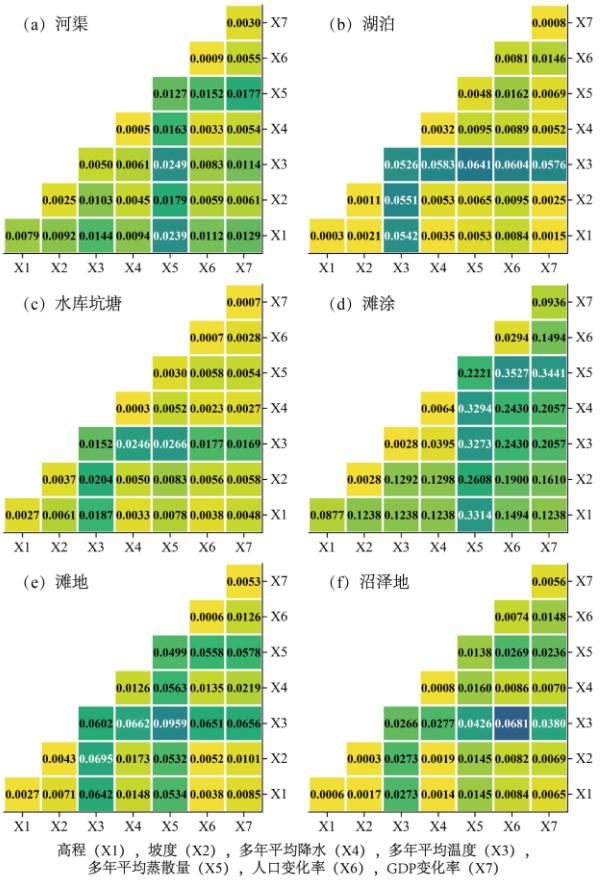


图 7 驱动因子交互作用探测结果

Fig 7 Detection results of the interaction of driving factors

4 讨论

4.1 河-湖-库-塘复合水域系统景观动态演变的驱动机制探讨

地表水体时空演变是人地关系研究的经典议题。长江中下游地区发育了由河流、湖泊、水库与坑塘构成的复合水域系统，其景观格局演变受控于自然地理基底与社会经济扰动的双重耦合（图 8）。地貌格局构成了水域景观空间分异的基础约束[37-38]。以丘陵山地区域为例，水域形态演变受地形条件与人类活动的协同制约：地形通过调控汇流路径、滞蓄能力及局地微气候，间接塑造了水域系统的稳定性阈值与演变轨迹。气候要素则主导着水域景观的多时间尺度波动，其中水热条件的动态组合尤为关键[39]。在典型的亚热带季风气候背景下，降水与蒸散的平衡关系直接决定流域水量收支状态，进而驱动河渠、湖泊、水库坑塘、滩地及沼泽等不同类型水域面积的协同或分异变化。季风变异固有的年际波动深刻影响水域系统的水文节律，已有研究表明干旱事件可显著改变鄱阳湖流域的降水-径流响应关系，导致同等降水条件下非干旱期径流增量更为显著[40]。在社会经济因素方面，围湖造田、排水垦殖及快速城镇化等行为持续压缩天然河流、湖泊、河漫滩等水域空间，成为水域景观面积萎缩的主要驱动力。同时，农业结构转型、水利基础设施建设等活动则推动渠道、水库坑塘等人工水域面积增长，这与 Zhai 等[41]的研究结论具有相似性，表明人类活动并非单向侵占水域资源，而是通过重构水域类型与空间配置，重塑流域水域景观的结构与功能。政策调控作为人为驱动的关键中介，其作用强度与方向呈现阶段性特征。1980—1990 年，流域水面率快速上升，可能与改革开放初期农田水利建设、坑塘养殖业快速发展以及“退田还湖”等保护政策相继实施有关[42-44]。1995—2005 年，流域水面率呈波动上升态势，河渠、湖泊、水库与坑塘等水体面积出现阶段性扩展，既体现了 1998 年长江特大洪水后“平垸行洪、退田还湖”生态修复政策引发的水面恢复效应[45-46]，也反映了三峡工程等重大水利设施运行带来的水文调控作用；2010—2020 年，流域水面率波动下降则折射出湿地生态修复成效与城镇化持续推进之间的复杂博弈。

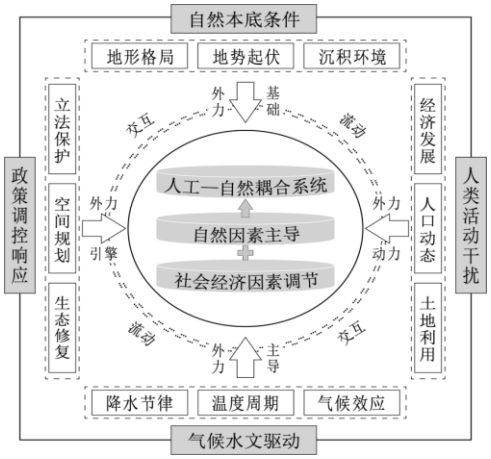


图 8 长江中下游河-湖-库-塘复合水域景观动态演变驱动机制分析

Fig 8 Analysis of the Driving Mechanism of the Human-Natural Coupling System

此外，长江中下游流域跨域多个行政区划，部分子流域水域景观变化呈现显著分异。如汉江流域作为南水北调中线工程核心水源区，依托集中水利投入，水域面积增幅达 37.10%，凸显重大工程对水域格局的塑造作用。太湖流域作为高度人工化的平原河网区，在农业结构转型、防洪体系完善及城镇水域强制配建等因素综合影响下，水域面积增幅达 12.89%。值得注意的是，自三峡工程正式运行以来，长江干流、洞庭湖与鄱阳湖流域水面率变化趋于稳定，表明大型水利工程通过调节河湖水位节律与径流过程，系统调控区域水文情势，有效削弱气候波动对水域面积的扰动，进而在宏观尺度上部分弥合因行政区划分割与治理策略差异所引发的局部水域动态失衡。

基于上述分析，针对长江中下游流域河-湖-库-塘复合水域系统结构复杂、动态演化且受自然与人为双重驱动的特征，其水资源管理亟需实现从碎片化管控向系统性治理推进。首先，应以流域为基本治理单元，践行“山水林田湖草沙”生命共同体理念，推动管理边界与生态边界协同，统筹上下游、左右岸、干支流及各类水体的系统修复与功能联动，构建完整的流域生态系统保护框架。其次，同步构建智慧流域管理体系，依托高频立体监测、多情景动态模拟与生态阈值预警机制，增强对非线性水文过程的适应性调控能力，通过现代科技手段实现流域水资源的精细化管理和科学调度。此外，创新生态—经济协同路径，完善跨区域横向生态补偿机制，拓展生态产品价值实现模式（如碳汇交易、湿地银行），并深化公众参与，将保护成效转化为区域可持续发展动能。

4.2 研究局限与展望

本文将河-湖-库-塘复合水域景观视为“生命共同体”，基于 1980-2020 年长时序遥感数据，系统揭示了长江中下游复合水域系统的景观格局演变特征及其驱动机制。研究视角上，突破传统单一水体类型分析的局限，从系统论视角揭示不同类型水体间因水文连通性与生态过程耦合所形成的网络化结构特征，丰富了水域景观生态学的理论内涵。演变规律上，开展该区域复合水域系统大尺度综合研究，为理解水域景观对气候变化与人类活动的响应规律提供了长时序实证依据。驱动机制上，定量识别了自然因素与人为活动的主控因子及其交互作用，初步揭示了多要素耦合的驱动机制。实践价值上，研究成果可为长江中下游流域生态修复与国土空间优化提供科学参考。

本研究仍存在以下局限，同时也是未来深化研究的方向：数据源与时间尺度方面，受数据更新进度与获取权限限制，研究时段仅覆盖至 2020 年，且主要基于公开遥感数据产品，后续应拓展更高分辨率数据源，开展更长时序、更近时段的动态追踪，以揭示复合水域系统的演变趋势与近期转折。驱动机制分析深度方面，本文尚未引入社会-生态耦合系统框架与系统动力学模型，对多要素互馈过程的模拟仍属初步，未来需构建社会-生态系统耦合模型，深化对非线性驱动机制的系统解析。研究方法方面，地理探测器 q 值结果依赖自变量空间分层的合理性，本文采用的自然断点法存在一定主观性，后续应探索多方法对比验证（如随机森林、结构方程模型），提升驱动因子识别结果的稳健性。功能与服务评估方面，本文聚焦于格局演变分析，尚未系统关联水域系统的生态功能与生态系统服务变化，后续应在格局研究基础上，进一步揭示“格局-过程-功能-服务”的级联效应，为国土空间治理提供更全面的科学支撑。

5 结论

本文从河-湖-库-塘复合水域景观的系统视角，揭示了长江中下游地区水资源系统的时空动态规律，并探究其自然与人为耦合驱动机制。主要结论如下：

1）水域景观总面积呈增长态势，水面率由 4.44%增至 5.03%。其中，河渠、水库坑塘和滩地面积显著增加，而湖泊、滩涂和沼泽地面积则明显减少；各子流域水面率均呈现不同程度上升。

2）水域类型转移呈现显著的非对称性。河渠、水库坑塘和滩地表现为转入大于转出，而湖泊、滩涂和沼泽地则转出大于转入；水域类型转换的热点区域集中于汉江、洞庭湖和鄱阳湖等流域，主要转换路径包括湖泊向滩地转化、滩地向水库坑塘转化以及滩地向河渠转化。

3）水域景观整体趋于破碎化与复杂化。NP、PD、ED、LSI、COHESION、SHDI、SHEI 等景观指数呈上升趋势，AI 指数呈下降趋势；不同类型水域的格局演变存在显著分异，水库坑塘呈现破碎化与集聚性并存的特征，而湖泊与沼泽地的连通性则持续减弱。

4）水域演变受自然与人为因素协同驱动，自然因素主导作用更为显著。河渠、水库坑塘和滩地主要受地形、气候等自然因素控制，湖泊和沼泽地则受降水量、蒸散量及社会经济因素共同影响，滩涂未表现出显著的主导驱动因素；在交互作用方面，河渠、湖泊和水库坑塘系统中多数影响因素呈现非线性增强关系，而滩涂、滩地和沼泽地系统的非线性增强效应相对较弱。

6 参考文献

[1] Yu KJ. On the concept of landscape and its research development. *Journal of Beijing Forestry University*, 1987, **9**(4): 433-439. DOI: 10.13332/j.1000-

1522.1987.04.019 . [俞孔坚. 论景观概念及其研究的发展. 北京林业大学学报, 1987, **9**(4): 433-439.]

[2] Liu YC, Du ZX, Shi Q *et al*. Connotation analysis and resilience assessment index system development for the water resources-water environment-water ecology coupled system. *Journal of Ningbo University*: *Natural Science & Engineering Edition*, 2025, **38**(5): 31-42. DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2025.0323. [刘永超, 杜政轩, 施琪等. 水资源、水环境、水生态复合系统内涵解析及韧性评估指标体系研究. 宁波大学学报: 理工版, 2025, **38**(5): 31-42.]

[3] Wang WH, Zhong YX, Ma HZ *et al*. Spatio-temporal variations and influencing factors of ecological resilience in the Aquatic-Terrestrial Ecotone of Poyang Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(22): 9514-9526. DOI: 10.20103/j.stxb.202210253041. [王文慧, 钟业喜, 马宏智等. 鄱阳湖水陆交错带生态韧性时空变化及影响因素. 生态学报, 2023, **43**(22): 9514-9526.]

[4] Ma HZ, Zhong YX, Ou MH *et al*. Scope division of the aquatic-terrestrial ecotone of Poyang Lake from the perspective of human-land relationship. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(12): 4959-4967. DOI: 10.5846/stxb202106211644. [马宏智, 钟业喜, 欧明辉等. 基于人地关系视角的鄱阳湖水陆交错带范围划分. 生态学报, 2022, **42**(12): 4959-4967.]

[5] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al*. Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 799-810. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略.湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]

[6] Yu PH, Feng MX, Liu B *et al*. Demarcation and administration of watershed ecological protection red line considering the ecological security pattern—a case of the Qilu Lake watershed, Yunnan Province. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 89-99. DOI: 10.18307/2020.0109. [余珮珩, 冯明雪, 刘斌等. 顾及生态安全格局的流域生态保护红线划定及管控研究——以云南杞麓湖流域为例.湖泊科学, 2020, **32**(1): 89-99.]

[7] Chen LM, Liu YC, Li JL *et al*. Surface water changes in China's Yangtze River Delta over the past forty years. *Sustainable Cities and Society*, 2023, **91**: 104458. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104458.

[8] Huang WJ, Duan WL, Nover D *et al*. An integrated assessment of surface water dynamics in the Irtysh River Basin during 1990–2019 and exploratory factor analyses. *Journal of Hydrology*, 2021, **593**: 125905. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125905.

[9] Chen HZ, Shi TZ, Wu GF. The dynamic analysis of lake landscape of Wuhan City in recent 40 years. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 745-754. DOI: 10.18307/2015.0424. [陈海珍,石铁柱,邬国锋.武汉市湖泊景观动态遥感分析(1973—2013 年).湖泊科学,2015,**27**(4):745-754.]

[10] Yue H, Liu Y, Wei JL. Dynamic change and spatial analysis of Great Lakes in China based on Hydroweb and Landsat data. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, **14**(3): 149. DOI: 10.1007/s12517-021-06518-4.

[11] Luo L, Mao DH, Wang ZM *et al*. Analysis of dynamics and driving forces of lakes and reservoirs in western Songnen Plain. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(22): 285-291. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.22.039. [罗玲, 毛德华, 王宗明等. 松嫩平原西部湖泊与水库/坑塘动态变化及驱动因素分析.农业工程学报, 2015, **31**(22): 285-291.]

[12] Liu YC, Li JL, Wang XX *et al*. Changes of wetland in the Sanmen Bay, Zhejiang Province based on Landsat time-series remote sensing images. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(4): 1036-1048. DOI: 10.31497/zrzyxb.20220414. [刘永超, 李加林, 王新新等. 浙江三门湾湿地遥感时间序列演变分析. 自然资源学报, 2022, **37**(4): 1036-1048.]

[13] Zheng YM, Zhang HY, Niu ZG *et al*. Preliminary evaluation on the protection effect of China national wetland nature reserve. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(4): 207-230. [郑姚闽, 张海英, 牛振国等. 中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估. 科学通报, 2012, **57**(4): 207-230.]

[14] Wang ZM, Yan YY, Zhao CP *et al*. Advances and perspectives in coastal wetland remote sensing research. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, **29**(6): 1938-1962. DOI: 10.11834/jrs.20254407. [王宗明,颜洋洋,赵传朋等.滨海湿地遥感研究进展与展望.遥感学报,2025,**29**(6):1938-1962.]

[15] Jia YY, Tang XL, Tang FL *et al*. Research on human activity intensity and its impact on wetland landscape pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(4): 950-963. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202004016. [贾艳艳, 唐晓岚, 唐芳林等. 长江中下游流域人类活动强度及其对湿地景观格局影响研究.长江流域资源与环境, 2020, **29**(4): 950-963.]

[16] Zhang YY, Cai XB, Yang C *et al*. Driving force analysis of landscape pattern changes in Honghu Wetland Nature Reserve in recent 40 years. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 171-182. DOI: 10.18307/2019.0116. [张莹莹, 蔡晓斌, 杨超等. 1974—2017 年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析.湖泊科学, 2019, **31**(1): 171-182.]

[17] Chen LM, Liu YC, Li JL *et al*. Divergent dynamics of surface water patterns and structures in Europe's coastal-zone basins. *Ecological Informatics*, 2025, **87**: 103089. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2025.103089.

[18] Hou XJ, Feng L, Tang J *et al*. Anthropogenic transformation of Yangtze Plain freshwater lakes: Patterns, drivers and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **248**: 111998. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111998.

[19] Chen Q, Li ZJ, Jin ZW *et al*. Spatio-temporal evolution and driving mechanisms of lakes water color in the Yangtze River source region over the past 40 years. *J Lake Sci*, 2025, **37**(4): 1266-1278. DOI: 10.18307/2025.0421. [陈齐,李志晶,金中武等.近 40 年长江源区湖泊群水色时空演变及其驱动机制. 湖泊科学,2025,**37**(4):1266-1278.]

[20] He CL, Pu JW, Shen JX. Spatial-temporal changes and driving mechanisms of landscape ecological security in lower reaches of Lancang River during 2005-2018. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, **40**(4): 219-227. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.030. [和春兰, 普军伟, 沈金祥. 2005—2018 年澜沧江下游流域景观生态安全时空变化及其驱动因素. 水土保持通报, 2020, **40**(4): 219-227.]

[21] Liu YC, Li JL, Yuan QX *et al*. Patterns of landscape ecological risks in Xiangshangang Bay Basin of China. *Marine Science Bulletin*, 2016, **35**(1): 21-29. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2016.01.004. [刘永超, 李加林, 袁麒翔等. 象山港流域景观生态风险格局分析. 海洋通报, 2016, **35**(1): 21-29.]

[22] Li JL, Yang JM, Liu YC *et al*. Analysis of water system pattern and connectivity change in the Poyang Lake Basin. *Water Resources Protection*, 2026, **42**(1): 30-38. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2026.01.004. [李加林, 杨佳铭, 刘永超等. 鄱阳湖流域水系格局与连通性变化分析.水资源保护, 2026, **42**(1): 30-38.]

[23] Fu WX, Gao C, Ren GY *et al*. Construction of composite blue-green ecological network of Wuhan City based on complex network theory. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, **36**(7): 2139-2149. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202507.021. [符文欣, 高畅, 任冠尧等. 基于复杂网络理论的武汉市复合蓝绿生态网络构建. 应用生态学报, 2025, **36**(7): 2139-2149.]

[24] Tan J, Zhao SN, Tan XL *et al*. Change characteristics of land use and landscape pattern in Dongting Lake during 1996-2016. *Ecological Science*, 2017, **36**(6): 89-97. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.06.013. [谭洁, 赵赛男, 谭雪兰等. 1996—2016 年洞庭湖区土地利用及景观格局演变特征. 生态科学, 2017, **36**(6): 89-97.]

[25] Zhao QY, Jiang P, Zhu ZQ *et al*. Evolution and driving forces analysis of wetland landscape pattern around Chaohu Lake from 1975 to 2020. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, **39**(5): 45-53, 62. DOI: 10.11988/ckyyb.20210199. [赵秋雨, 江鹏, 朱志强等. 1975—2020 年环巢湖湿地景观格局演变及驱动分析.长江科学院院报, 2022, **39**(5): 45-53, 62.]

[26] Liu JY, Kuang WH, Zhang ZX *et al*. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局.地理学报, 2014, **69**(1): 3-14.]

[27] Liu JY, Ning J, Kuang WH *et al*. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(5): 789-802. [刘纪远, 宁佳, 匡文慧等. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征.地理学报, 2018, **73**(5): 789-802.]

[28] Yang YZ, Tian P, Li JL. Spatiotemporal variation characteristics and driving mechanisms of coastal urban water systems in the East China Sea from 1980 to 2020. *Marine Science Bulletin*, 2023, **42**(4): 430-443. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2023.04.007. [杨昀则, 田鹏, 李加林. 1980—2020 年东海沿海城市水域系统时空变化特征及驱动机制. 海洋通报, 2023, **42**(4): 430-443.]

[29] Liu YC, Liu YX, Li JL *et al*. Evolution of landscape ecological risk at the optimal scale: A case study of the open coastal wetlands in Jiangsu, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(8): 1691. DOI: 10.3390/ijerph15081691.

[30] Tong C, Li JL, Ye MY *et al.* The effects of landscape pattern change on ecosystem services value in the coastal zone of the East China Sea. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2020, **47**(4): 492-506，520. [童晨, 李加林, 叶梦姚等. 东海区海岸带景观格局变化对生态系统服务价值的影响. 浙江大学学报(理学版), 2020, **47**(4): 492-506，520.

[31] Wang JF, Li XH, Christakos G *et al*. 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. DOI: 10.1080/13658810802443457.

[32] Yang YZ, Tian P, Li JL *et al*. Analysis on the characteristics and driving forces of spatiotemporal changes of Zhejiang water system. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2022, **49**(4): 508-520. [杨昀则, 田鹏, 李加林等. 浙江省水域系统时空变化特征及驱动力分析. 浙江大学学报(理学版), 2022, **49**(4): 508-520.

[33] Zhang ZT, Wang YS, Qin H *et al*. The hydrological regime of Taihu Lake under the influence of anthropogenic activities. *Journal of Hydrology*: *Regional Studies*, 2023, **50**: 101568. DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101568.

[34] Yang L, Wang LC, Yu DQ *et al*. Four decades of wetland changes in Dongting Lake using Landsat observations during 1978–2018. *Journal of Hydrology*, 2020, **587**: 124954. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124954.

[35] Zhang Q, Li L, Wang YG *et al*. Has the Three-Gorges Dam made the Poyang Lake wetlands wetter and drier *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(20): 2012GL053431. DOI: 10.1029/2012GL053431.

[36] Peng Y, He GJ, Wang GZ *et al*. Surface water changes in Dongting Lake from 1975 to 2019 based on multisource remote-sensing images. *Remote Sensing*, 2021, **13**(9): 1827-1827. DOI: 10.3390/rs13091827.

[37] Jia YY, Tang XL, Tang FL *et al*. Spatial temporal evolution of landscape pattern in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin from 1995 to 2015. *Journal of Nanjing Forestry University*: *Natural Sciences Edition*, 2020, **44**(3): 185-194. [贾艳艳, 唐晓岚, 唐芳林等. 1995—2015 年长江中下游流域景观格局时空演变. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, **44**(3): 185-194.]

[38] Shi XL, Qin BQ. Evolution and ecological environment of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Journal of Ningbo University*: *Natural Science & Engineering Edition*, 2007, **20**(2): 221-226. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5132.2007.02.018. [史小丽, 秦伯强. 长江中下游地区湖泊的演化及生态特性.宁波大学学报: 理工版, 2007, **20**(2): 221-226.]

[39] Liu JP, Gao J, Dong CY. Regional differentiation and factors influencing changes in swamps in the Sanjiang Plain from 1954 to 2015. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(13): 4821-4831. DOI: 10.5846/stxb201802270394. [刘吉平, 高佳, 董春月. 1954—2015 年三江平原沼泽湿地变化的区域分异及影响因素. 生态学报, 2019, **39**(13): 4821-4831.]

[40] Chen HX, Jin GQ, Tang HW *et al*. Spatiotemporal variations of water levels and river-lake interaction in the Poyang Lake basin under the extreme drought. *Journal of Hydrology*: *Regional Studies*, 2025, **57**: 102165. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.102165.

[41] Zhai GQ, Du JQ, Li LJ *et al*. Spatiotemporal dynamics and driving factors of small and micro wetlands in the Yellow River Basin from 1990 to 2020. *Remote Sensing*, 2024, **16**(3): 567. DOI: 10.3390/rs16030567.

[42] 武汉市蔡甸区地方志编纂委员会. 蔡甸区志(1980-2000). 武汉: 武汉出版社, 2008.

[43] 武汉市黄陂区地方志编纂委员会. 黄陂区志(1980-2004). 武汉: 武汉出版社, 2008.

[44] 武汉市江夏区地方志编纂委员会. 江夏区志(1980-2004). 武汉: 武汉出版社, 2007.

[45] 中共湖南省委湖南省人民政府. 中共湖南省委湖南省人民政府关于平垸行洪、退田还湖、移民建镇的若干意见. 长沙：湖南政报, 1999, (2): 29-31.

[46] 江西省人民政府. 江西省平垸行洪退田还湖移民建镇若干规定. 南昌： 江西政报, 2001(2): 8-14.