

# 1990—2020 年洞庭湖流域水网格局 演变与经济驱动分析

杨帆<sup>1</sup> 欧坚港<sup>1</sup> 段宁<sup>2</sup> 赵子羽<sup>11</sup>

(1. 中南大学 建筑与艺术学院, 中国湖南 长沙 410075;

2. 长沙市委政策研究室, 中国湖南 长沙 410013)

**【摘要】:** 以洞庭湖流域的岳阳、益阳、常德三市为研究对象, 运用 NDWI 指数、Horton-Strahler 水网分级、水网格局指标计算、协调状态评估、多元线性回归分析等方法, 探析洞庭湖流域 1990—2020 年水网空间形态和结构演化特征, 揭示水网格局演变的主要经济驱动机制。结果表明: (1) 1990—2020 年, 洞庭湖流域水面率、河网密度和干流面积长度比值等指标均呈现波动减少趋势, 水网结构稳定度波动明显, 流域水网生态空间出现破碎化和主干化趋势。(2) 洞庭湖流域水网生态空间退化呈现明显的空间差异特征, 城市间社会经济与水网格局协调关系呈现出“西部>东部>中部”的空间特征。(3) 洞庭湖流域水网格局差异演变受到多重因素影响, 其中城镇化率是首要因素, 也是水网生态空间退化的主要驱动力; 产业结构是重要因素, 其中第一产业发展对水网格局演变具有正向影响作用; 人口数量 and 经济发展水平是水网空间退化的次要因素。持续的城镇化进程给流域水网生态空间保护带来严峻挑战, 未来洞庭湖流域水网治理应重点关注城镇—水网协调发展严重失衡的地区, 通过控制负向驱动因素发展来保障流域水生态安全, 促进社会经济和水网格局协调发展。

**【关键词】:** 城镇化 水网格局 时空演变 洞庭湖流域 经济驱动

**【中图分类号】:** K928.43 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2022) 06-0188-10

大湖流域水网空间具有水生态高敏感性, 在生态文明治理背景下, 水网格局演变与社会经济发展之间存在紧密复杂的协同博弈关系<sup>[1,2]</sup>。自我国城镇化进入快速发展阶段以来, 大湖流域地区城市建设与扩张逐渐延伸至河湖水网等生态高敏感地区, 流域水系萎缩、河湖连通阻塞等水网空间退化现象普遍<sup>[3,4]</sup>, 带来洪涝频发、水生态平衡破坏、水质劣化等城市水生态安全问题, 形成城镇化发展与水网空间相互约束胁迫的局面。

由于大湖流域水网空间受到河湖自然约束力和社会经济驱动力的共同影响, 复杂背景条件下的水网空间演化特征和驱动协调关系往往被忽略。目前流域水网空间相关研究已日渐丰富, 主要集中在水网格局特征<sup>[5,6,7,8]</sup>、水网空间演变影响因素<sup>[9,10,11,12,13,14]</sup>和水网生态功能响应<sup>[15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27]</sup>等方面, 研究方法也逐渐由主观评价向数理分析及复杂模型推演转变<sup>[3]</sup>。但已有研究在跨地区流域水网空间演变轨迹识别、社会经济发展与水网空间保护协调与驱动机制等方面仍有不足, 亟待深入探索地区间水网资源禀赋和社会经济协调发展的差异, 解析流域水网格局演变时空分异特点, 诊断水网演变与社会经济发展的冲突关系, 引导

**作者简介:** 杨帆 (1982—), 女, 湖南岳阳人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为城乡规划、生态国土空间规划。E-mail:582228988@qq.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (72174211、51608535); 湖南省自然科学基金项目 (2018JJ3667); 湖南省哲学社会科学基金项目 (19YBA347); 中南大学研究生教改课题 (2020JGB139)

水网与社会经济协调发展。

洞庭湖流域作为我国第二大淡水湖以及长江流域重要的蓄滞洪区和水源补给功能区，也是长江经济带上城镇化高速发展的经济活跃地区<sup>[18]</sup>。本文所研究的岳阳、益阳、常德三市位于洞庭湖流域北部，是典型大湖流域河网地区。区域内农业发展程度高，是我国特大型商品粮基地。1990—2020年，研究区内城市化率增长迅速，GDP实现近60倍飞跃。剧烈的人类活动改变了水网原有生态系统，城镇化导致不透水面迅速扩张，农田、水域等面积持续萎缩，水网格局破坏严重。社会经济与水网生态格局的冲突加剧，显著影响水网发挥行洪排涝功能与生态协调功能。因此，本文以洞庭湖流域典型城市岳阳、益阳、常德三市为例，探索洞庭湖流域水网格局在1990—2020年的基本演变规律，揭示水网格局时空演化中的经济驱动机制，解释流域水网空间退化的关键要素，为大湖流域地区水网格局与社会经济协调发展提供参考。

## 1 研究区域概况与基础数据

### 1.1 研究区域概况

本文的研究区域为岳阳、益阳、常德三市，总面积约45382km<sup>2</sup>，位于湖南省东北部，包括中部河湖冲积平原、环湖丘陵岗地和低山，是洞庭湖流域汇流区，也是与长江交汇的重要调蓄洪功能区。研究区内汇集7条水系：北部有藕池河、松滋河和虎渡河分流长江水汇入，南部有湘江水系、资江水系、沅江水系，西部有澧水水系注入，最后通过洞庭湖水网滞留调蓄，最后从岳阳市城陵矶再汇入长江。多条水系汇入洞庭湖平原以后，水流平缓、交错、迂回，形成典型平原水网。在近年来的快速城市化进程中，人类社会经济活动愈加频繁、剧烈，人地关系日趋紧张，经济活动、产业和土地利用结构的改变深刻影响这一地区的水系格局（图略）。

### 1.2 数据来源

本文所使用数据包括岳阳、益阳、常德三市多年遥感数据和社会经济统计数据。①社会经济统计数据来源于1991—2021年湖南省统计年鉴（<http://tjj.hunan.gov.cn/>）。②遥感数据包括高程数据和水网数据：其中高程数据是由SRTMDEM(30m)数据影像提取、转换格式和拼接得到；1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020年水体30m分辨率栅格数据来源于Landsat5、Landsat7、Landsat8三个卫星影像数据库，参照彭妍菲等学者遥感提取方法<sup>[19]</sup>，通过人机交互解译方法和GEE平台<sup>[20]</sup>，实现影像数据的预处理、特征提取和空间统计获取，数据总体精度均在80%以上，Kappa系数达到0.80，解译结果满足本研究需要。

## 2 研究方法

本文以洞庭湖平原河网地区岳阳、益阳、常德三市为研究对象，构建1990—2020年洞庭湖流域水网格局的时空演变与经济驱动分析的技术路径，具体步骤可分为以下四步：①收集河网地区多时段水网自然环境本底数据与社会经济发展指标数据，构建河网型城市多时段基础数据库。②基于多年遥感数据影像提取原始河网信息，通过地形模拟、河网形态划分、管理和社会功能等要素建立河网分级模型。③通过河网矢量化、GIS空间计算和数学统计，测算河网形态和结构特征参数，综合空间拓扑结构和几何结构两个层面，描述研究区水网格局在年际间的演变规律和区域间的分异规律。④根据耦合协调度和多元线性回归模拟，揭示研究区各区县间社会经济发展和水网格局演变的耦合协调关系与驱动因素，探究洞庭湖流域水网格局在快速社会经济发展影响下的时空演变特征及经济驱动机制（图1）。

### 2.1 流域水系遥感提取与分级处理

#### 2.1.1 水系遥感提取

水系遥感提取主要参考水系指数计算，利用遥感影像电磁波波长差异产生的反射率差异来增强水体波段特征，提取水体。本文基于 GEE 平台的遥感数据处理主要通过调用 Landsat-5/7/8 影像数据库，筛选出整体云量小于 10%，符合研究要求的遥感数据，使用 NDWI 指数运算<sup>[21, 22, 23]</sup>，并将研究区范围数据作为掩膜初步提取研究期内逐月水体<sup>[24, 25]</sup>，筛选有水月份大于等于 7 个月的稳定水域范围，作为研究基础数据。

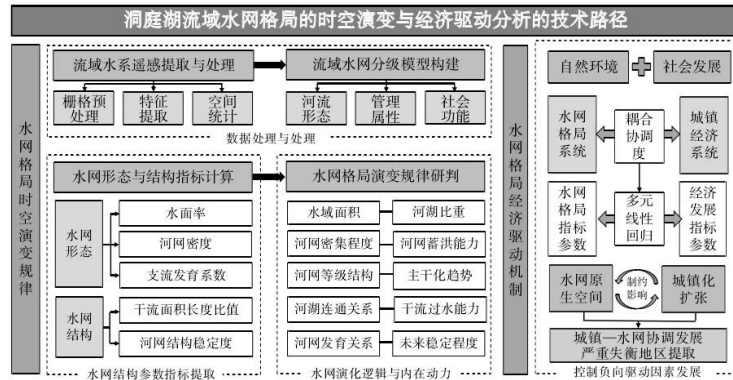


图 1 研究技术路径

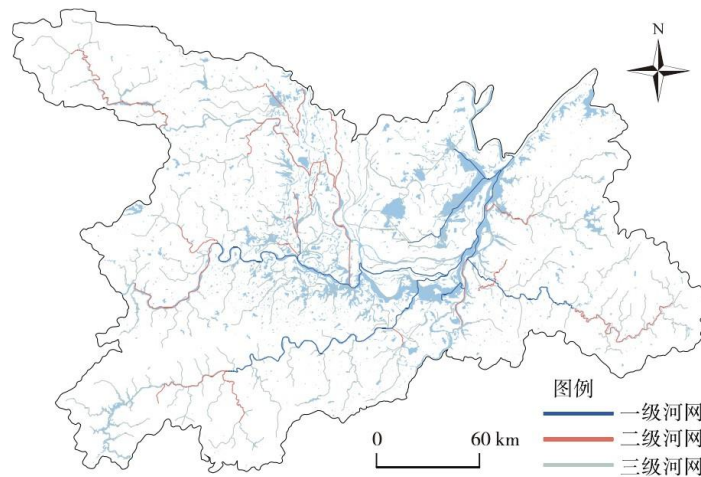


图 2 洞庭湖流域水网分级模型

### 2.1.2 流域水网分级

本文基于地形数据生成的水网分级模型，综合考虑河流形态（宽度）、管理属性（范围）、社会功能（蓄洪排涝能力）以及城市发展中的河道和湖泊的重要程度等因素进行分级<sup>[26, 27, 28]</sup>，得到研究区河网分级模型（图 2）。

### 2.2 水网格局演变指标体系

结合洞庭湖区水网分级和演化特点，构建水网结构参数指标，对近 30 年水网格局进行定量描述，针对水网形态和结构两方面揭示洞庭湖水网演化逻辑和内在动力。其中，水网形态特征指标包括水面率（ $W_r$ ）、河网密度（ $D_d$ ）和支流发育系数（ $K$ ）；水网

结构特征选取干流面积长度比 ( $R_{dl}$ ) 与河网结构稳定度 (SR)。

### 2.3 水网格局经济驱动分析技术

#### 2.3.1 水网格局与社会经济耦合协调度

本文通过计算水网生态空间与社会经济二者间的协调度指数, 探寻研究区域各区县社会经济发展指标与各水系格局参数之间的协调关系, 得到水网格局演变与社会经济发展的耦合协调程度, 计算过程包含以下两步:

①水网系统和城镇经济系统的价值极差标准化处理: 对指标数据进行归一化处理, 运用熵值法确定各项指标权重, 测算水网系统和城镇经济系统的价值指数。计算公式如下:

$$U_1 = \sum_{j=1}^m \lambda_z \times u_{zj}; U_2 = \sum_{j=1}^m \lambda_m \times u_{mj} \quad (1)$$

式中:  $u_i$  表示指标归一化后的值;  $\lambda_z$  和  $\lambda_m$  分别表示水网系统和城镇经济系统指标权重;  $U_1$ 、 $U_2$  分别表示城镇经济系统和水网系统价值。

②水网系统与城镇经济系统的耦合协调模型构建: 分析各区县水网参数系统与城镇经济系统的协调度状况, 借鉴协调等级判定标准和分类体系, 采用均匀分布函数将水网参数系统与城镇经济系统协调度划分为 10 个等级, D 值越接近于 1 表明两个系统耦合协调程度越高。计算公式如下:

$$C = \frac{\sqrt{U_1 \times U_2}}{(U_1 + U_2)/2} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times M}; M = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (3)$$

式中: C 为耦合度, 介于 0~1 之间, C 值越大, 表明系统间耦合度越高; D 为协调发展度;  $\alpha$  和  $\beta$  为权重系数, 鉴于水系发展和城镇建设相互影响与胁迫的关系, 取  $\alpha = \beta = 0.5$ 。

#### 2.3.2 水网格局与社会经济发展参数多元线性回归

本文通过多元线性回归模拟, 分析社会经济发展指标变化与水网格局指标变化之间的相关关系, 反映研究区域水网格局演变的驱动影响机制<sup>[28]</sup>, 其表达式为:

$$\begin{cases} \ln Y_1 = \beta + \alpha_1 \ln X_1 + \alpha_2 \ln X_2 + \cdots + \alpha_n \ln X_n + \varepsilon \\ \ln Y_2 = \beta + \alpha_1 \ln X_1 + \alpha_2 \ln X_2 + \cdots + \alpha_n \ln X_n + \varepsilon \\ \cdots \\ \ln Y_n = \beta + \alpha_1 \ln X_1 + \alpha_2 \ln X_2 + \cdots + \alpha_n \ln X_n + \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 是相关变量回归系数，是因变量应对不同自变量的驱动的弹性变化；常数  $\beta$  和  $\epsilon$  分别表示常数量和误差项； $X_1 \sim X_n$ 表示选取的经济驱动因素； $Y_1 \sim Y_n$ 表示水网格局参数。

### 3 1990—2020 年洞庭湖流域水网格局动态演变分析

#### 3.1 水网形态演变

通过对 1990—2020 年研究区水网的量化分析计算得到其 30 年间的水网形态格局变化（图 3），其中水域面积主要呈下降趋势，共缩减 1000.21km<sup>2</sup>，在 2005—2010 年水域面积缩减幅度最大。从变化区域来看，水面变化集中在中部平原湖泊周边，呈整体向内萎缩趋势，其中北部洞庭湖与中部沱漣港、万子湖周边的湖滨湿地水域缩减程度较大。此外，通过 GIS 分析研究区水网形态指标，得到 1990—2020 年水面率、河网密度和支流发育系数的变化情况（图 4）。

##### 3.1.1 水面率（Wp）时空变化

水面率是河湖总面积占流域总面积的比重，其变化情况反映研究区域水域面积变化情况。研究区水面率从 1990 年以来呈波动减少趋势，30 年总体水面率减少幅度达 24.81%。从空间上来看，水域减少集中发生在大型湖泊周边和低等级支流末端，萎缩方式以分散式为主，并同时发生在水网的各个位置，其中以岳阳市洞庭湖核心湖面衰减最为明显。从时间上来看，水面率变化年际衰减速度并不均匀，呈现“慢—快—慢”的波动下降趋势，其中 2001—2010 年 10 年间水面率降低速度最快，10 年间共减少 1446.33km<sup>2</sup>。

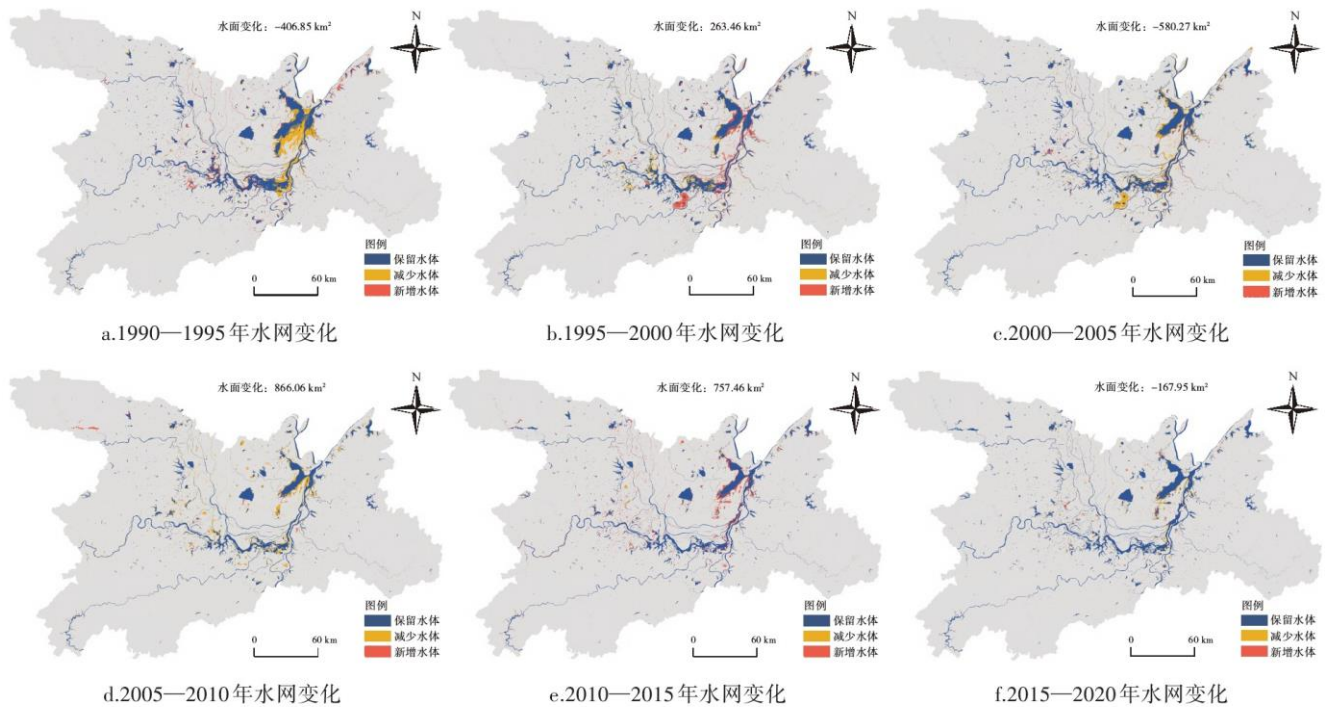


图 3 洞庭湖流域水网演变

##### 3.1.2 河网密度（Dd）时空变化

河网密度体现了水网分布疏密程度，可反映流域水体间的连通能力。研究区河网密度呈现“先减少后增加，总体减少”的变化趋势，30年整体衰减 $3.42 \times 10^{-3} \text{ km/km}^2$ 。河网数量和长度在空间变化上主要集中在二、三级支流，对湘、资、沅、澧4条干流影响较小。其中一级河网每10年变化浮动均在5%以内，二级、三级水网变化剧烈；在空间比例上，由于部分三级水网消失并合并为二级水网，研究区各级水网总长度比例关系逐渐由金字塔型结构转化为均衡型结构，一、二、三级河网组成结构由1990年的13.1:30.3:56.6逐步演变为2020年的13.4:40.3:46.3。从时间上来看，河网密度年际衰减速度呈现出“快—慢—快”的特征，在1990—2000年，三级河网大量拓宽合并为二级河网，三级河网10年间萎缩59.88%，整体河网衰减21.11%；在2001—2010年，二级河网减少，三级河网略微增加，整体河网长度衰减4.49%；2011—2020年，部分二级水网和湖面边缘被侵蚀、破碎，转化为二、三级河网，其长度和数量都有所增加，河网密度有所上升。

### 3.1.3 支流发育系数(k)变化

支流发育系数反映河网干、支流的发育情况，当水网趋于主干化发展时，数值越小。研究区域水网支流发育系数呈现“先减少后增加”的变化趋势。1991—2005年支流发育系数衰减剧烈，15年间系数减小27.61%，支流发育系数减小表明水网呈现主干化趋势。2005—2020年支流发育系数开始增长，研究区水系开始呈现出“自然型”→“井型”结构演变，井型结构作为一种典型过渡型河网结构，河流调蓄能力低于根据其水面积可能产生的调蓄能力，并且随城市化程度加剧和流域调蓄压力的增加，井型结构将逐步向干流型结构演化<sup>[27]</sup>。

### 3.2 水网结构演变

基于水网结构与功能视角，对洞庭湖流域水网连通结构和调蓄功能进行分析，计算干流面积长度比值( $R_{AL}$ )和河网结构稳定度(SR)(图5)。

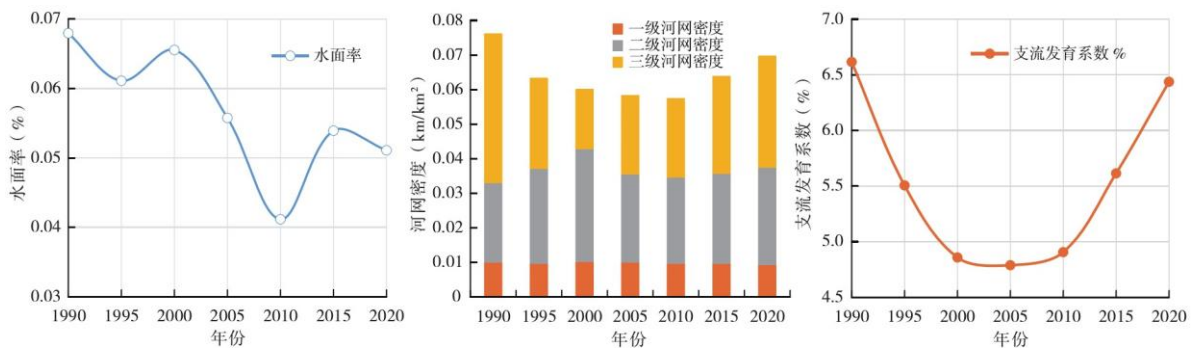


图4 洞庭湖流域水网面积、河网密度、支流发育系数的变化

#### 3.2.1 干流面积长度比值( $R_{AL}$ )变化

干流面积长度比值能体现水网蓄洪能力与河流连通性的关系，比值越小，表示河流的过水能力越弱。计算结果显示，30年间研究区干流面积长度比值呈现“增加—减少—增加”的波动下降趋势，减少幅度大于增加的幅度，表明流域水网主干道调蓄能力已经减弱。其中2001—2010年是城镇化快速发展的10年，干流面积长度比值下降速率也呈现加速趋势，10年间下降幅度达34.25%。此后随着研究区城市逐步进入高度城市化阶段，水网主要干流和河洪道逐渐被加固拓宽以应对洪涝风险，干流面积比值变化速度逐渐平缓。

#### 3.2.2 水网稳定度(SR)变化

河网结构稳定度反映水网面积与河流长度的变化同步情况，系数接近 1 时，表示水网面积与河流长度稳定发育。计算结果显示研究区水网逐渐由河流长度退化转变为水面面积退化。研究区河网结构稳定度在 30 年间呈现波动变化特征，2005 年以前，水网稳定度小于 1，表明水网面积衰减幅度小于河流长度，水网以河流长度衰退为主，水网稳定度降低，水网调蓄能力下降。而在 2005 年以后水网稳定度大于 1，水网面积衰减幅度大于河流长度，水网偏向水面面积衰退为主，河网相对结构稳定度增高，但整体水网蓄洪能力下降。

## 4 水网格局演化经济驱动分析

### 4.1 水网格局演变空间分异特征

统计 1990—2020 年研究区退化与新增水网图斑如图 6，在水网面积数量变化上，退化水网远大于新增水网，洞庭湖流域整体呈现出退化趋势；空间上，水网退化主要集中在流域下游，如岳阳楼区、沅江市和湘阴县的湖泊湿地周边，新增水网主要集中在上游地区，如石门县、武陵区等地区。

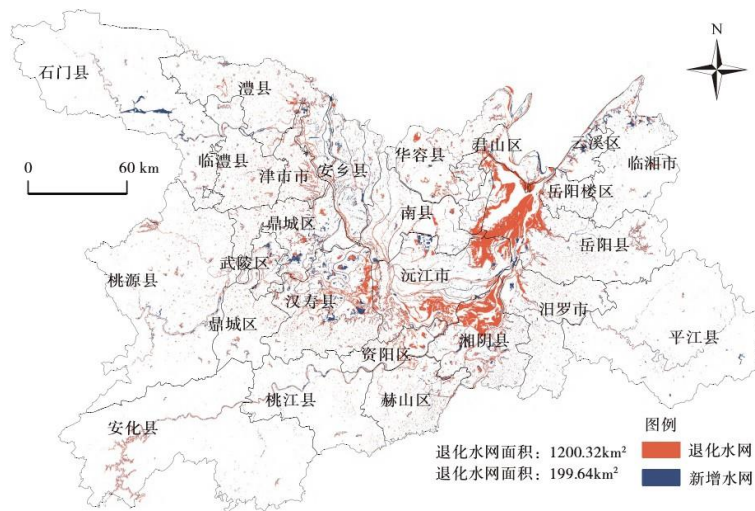


图 6 洞庭湖流域水网变化图斑

通过 GIS 统计岳阳、益阳、常德三市各区县 4 项水网格局参数 30 年间的变化量的相对比值（1990—2020 年变化量/1990 年水网初始状态），呈现各区县的演化分异特征，结果如图 7。从水网格局参数变化趋势来看，研究区各区县各项水系指标总体呈现衰减趋势，与水网整体退化趋势匹配，幅度上，岳阳县和沅江市水系指标减少幅度最大，其次是汉寿县、汨罗市和岳阳楼区，呈现“起点高，幅度大”的特点，石门县、赫山区和安乡县部分水系指标存在增长，呈现“起点低，幅度小”的特点。空间上来看，水系指标减少的区域主要集中在研究区中部，与水域分布存在一定的关联性。

尽管水网格局演化是自然力与人类活动共同作用的结果，但城镇化和社会经济的快速发展，人类活动对于水系格局变化的影响已经超过了自然因素<sup>[28]</sup>。人口、经济、产业结构等因素已经成为影响水网格局演变的主导因素<sup>[15, 16, 17, 18, 19, 20]</sup>，在快速发展的城市地区，生产要素配置的主体已经从政府转变为市场，城市间的劳动力，社会资本和产业大规模流动，促使各地社会经济差异发展，也影响着各地区水网格局演变方向和速度。为此，本文选取典型指标以分析社会经济发展对水系格局的影响。

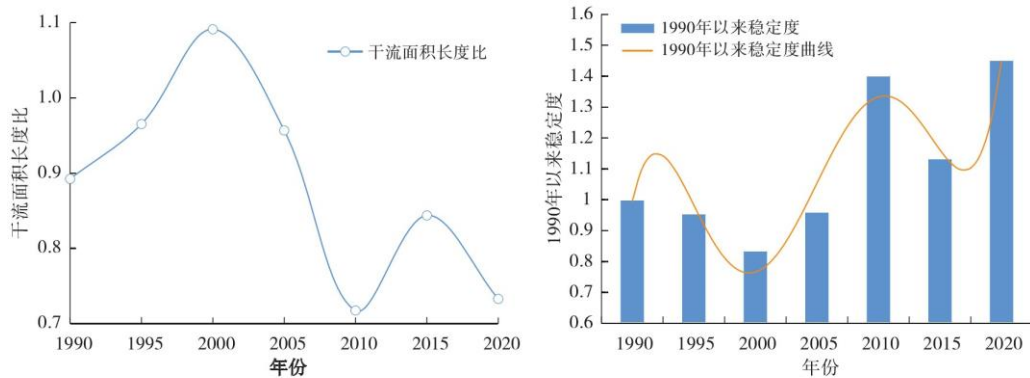


图5 干流面积长度比和河网稳定度演变趋势

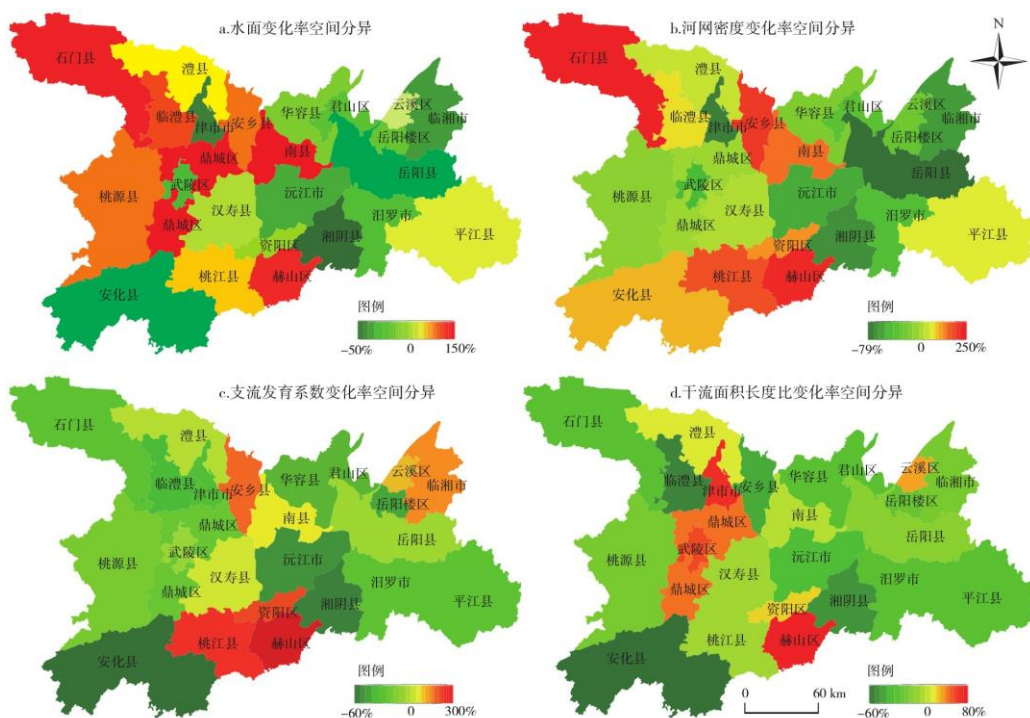


图7 1990—2020 水网格局指标变化率空间分异

#### 4.2 水网演变与社会经济发展耦合协调关系空间特征

通过测算研究区各地区城镇经济系统  $U_1$  得分和水网系统  $U_2$  得分，得出二者的耦合协调指数  $D$  (图8)。从水网和城镇经济的综合功效值关系来看，水网综合指数变化幅度明显大于城镇经济综合指数，可见1990—2020年洞庭湖流域社会经济稳定发展的同时，各县区间的水网演变差异也在增大；从水网和城镇经济的耦合协调等级来看，洞庭湖流域所有地区耦合协调指数均小于0.5，除武陵区以外，其余地区均属于中度失调地区及以下，可见整个洞庭湖流域各区县水系发展与城镇发展均处于胁迫冲突状态。

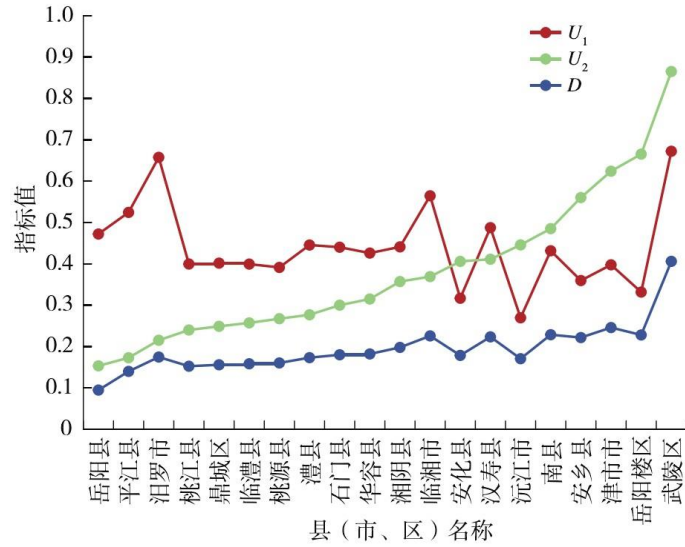


图8 耦合调度指数结果

绘制耦合协调空间分异结果(图9),进一步分析洞庭湖流域耦合协调情况,从空间分布上来看,洞庭湖流域各地区协调度等级总体呈现出西部→东部→中部递减的空间特征,并具有空间集聚和关联性特征。其中协调评价结果中处于极度失调或重度失调区域主要集中在湖区周边或河网交汇地区,如岳阳县、汉寿县、安乡县、南县、安乡县和津门市等区县;处于中度失调或濒临失调区域主要集中在远离湖区,城市发展扩张过程中受到水网空间限制较小的武陵区、石门县、桃江县、平江县、临澧县、桃源县和澧县等区县。

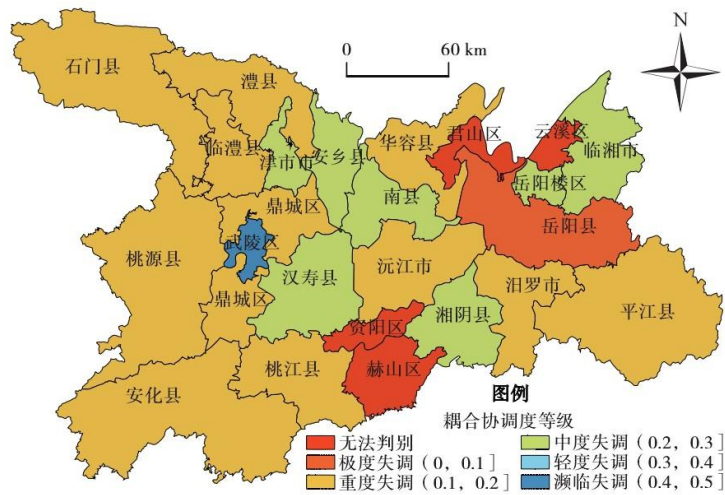


图9 耦合协调空间分异

#### 4.3 水网格局演变经济驱动机制分析

基于洞庭湖流域水网格局演化存在的空间分异特征,根据岳阳、益阳、常德三市的社会经济发展状况,遵循数据可获得、综合性、代表性和可量化性的原则,选取经济驱动因素作为解释变量,水网格局参数作为因变量进行回归模拟,分析洞庭湖流域社

会经济发展和水系格局变化的驱动关系，探讨水网格局演变空间差异化格局的产生机制。

在相关关系上，水面率、河网密度与解释变量均呈负相关关系；支流发育系数与城镇化水平、经济发展水平、人口数量呈负相关关系，与一产发展水平呈正相关关系；干流面积长度比与城镇化水平、经济发展水平、人口数量等解释变量呈正相关关系，与一产发展水平呈负相关；在相关性强度上，城镇化水平与水系各项指标关联性最强，其次为一产发展水平，经济发展水平与人口数量最弱。因此，基于城镇化发展、人口数量和分布、经济增长和第一产业规模变化探讨洞庭湖流域水网格局变化的驱动机制。

#### 4.3.1 土地城镇化和人口城镇化

城镇化水平带来城市空间的扩张会给城市周边和内部水网空间带来全面的消极影响<sup>[14]</sup>，是水网衰退的直接驱动因素。洞庭湖流域岳阳、益阳、常德三市区城镇化率从1990年的14.74%发展到2020年的55.75%，城市人口的增加势必会产生新的承载空间需求，1996—2018年，三市城市建成区面积从127.00km<sup>2</sup>增加到602.07km<sup>2</sup>。1990—2020年，研究区常住人口由1440.30万人增加到1596.35万人，其中基础条件较好、区位优势明显的地区人口吸引力大，而区位较差、基础条件较为不发达的地区人口则出现负增长。新增人口聚集带动了商业和房地产开发，“人水争地”问题和水网保护意识缺乏，导致城市建设用地不断占用城市周边水体和内部水网来进行扩张，引起流域水文过程的变化<sup>[10]</sup>，持续的城镇化发展给流域水网生态空间和水安全格局保护带来严峻挑战。

#### 4.3.2 社会经济发展

经济水平促进了地区人口就业、加速地区城镇化建设，同时经济发展会不断调整产业结构从而能分配资源要素，进而影响水网格局演变。洞庭湖流域30年间GDP由130.60亿元发展至7869.80亿元，增长了59.25倍，其中固定资产投资额由1990年的15.50亿元增长到2020年的4368.50亿元，增长高达约280.84倍，而建设用地就是固定资产投资中重要组成部分，研究区社会经济发展的快速增长，极大地提升了土地利用强度，也促进水网生态空间向城市新扩展空间转换。

#### 4.3.3 产业结构和第一产业发展

产业结构的调整会造成土地利用结构的转化以及建设用地的扩展，其中第一产业发展与水资源关系最为密切<sup>[30]</sup>，1990—2020年，研究区第二、三产业快速发展，第一产比重不断减少，从1990年占比71.46%减少至2020年25.12%，有效灌溉面积也从121.16万hm<sup>2</sup>减少到94.76万hm<sup>2</sup>，产业调整带来土地利用结构的转变，提高了水网空间转化为其他用地的速度，促进洞庭湖流域水系主干化现象的形成。而第一产业中农业和渔业等需要大量占用周边水面，促进湖面面积转化为农用地，同时开挖大量干、支渠引水分流<sup>[31]</sup>，修建人工支流引水排涝。洞庭湖区作为国家的十二大商品粮基地之一<sup>[32]</sup>，随着区内高标准优质粮田的建设，在第一产业高度集中的地区，水网分布呈现明显的不规则性，水系分布在局部集中增加。

## 5 结论与讨论

本文从时空分异视角研究洞庭湖流域典型城市岳阳、益阳、常德三市水网格局时空演化特点，结果表明研究区水网格局在1990—2020年动态演变中呈现破碎化和主干化趋势。水网萎缩主要集中在湖泊边缘和二、三级支流，在2000年以后，研究区水网结构开始加快衰退，水系结构变化剧烈，水系格局还没有进入新的平衡。同时，基于其存在的空间差异特征探究其形成机制，发现洞庭湖流域社会经济与水网格局整体处于不协调发展状态，城镇化水平、经济发展水平、人口数量和第一产业发达程度是洞庭湖流域水网格局差异化演化的主要经济驱动因素。在城镇化率高、经济发达、人口更集中的城市化地区，水网形态和结构特征退化趋势普遍高于其他地区，出现更明显的水网破碎化和河流主干化现象，水网格局与社会经济的冲突也更加严重。

---

作为国家层面促进中部地区崛起战略的重大举措，洞庭湖流域生态文明建设对引领经济社会全面发展具有重要意义，在工业化与城镇化的双轮驱动下，未来洞庭湖流域对于城镇发展空间的需求量仍会不断增大，城镇发展与水网空间的冲突会更加激烈。本文重点探究水网格局演变与城镇发展的空间关联性和驱动机制，对于识别洞庭湖流域水网生态空间敏感区域，指导水生态安全管制措施制定有重要现实意义。后续研究可以从微观视角划定洞庭湖流域水网空间高敏感地区内的社会经济活动集聚边界，更准确识别、预测水网格局劣变区域，进一步指导流域水网空间修复治理，促进洞庭湖流域社会经济与水生态空间协调发展。

#### 参考文献:

- [1]杨凯, 袁雯, 赵军, 等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应[J]. 地理学报, 2004(4):557-564.
- [2]史书华, 陈星. 基于调蓄能力与水系结构关系分析的城市合理水面率研究——以常熟市为例[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2020, 42(2):1-6.
- [3]赵锐, 赵宏, 何隆华, 等. 地理现象分形研究[J]. 地理科学, 1994(1):9-15, 99.
- [4]林芷欣, 许有鹏, 代晓颖, 等. 城市化进程对长江下游平原河网水系格局演变的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(11):2612-2620.
- [5]罗英菡, 刘畅, 田国行. 城市发展与河网演变间的相互作用——以郑州市主城区为例[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2):258-266.
- [6]Napieralski J A, Carvalhaes T. Urban stream deserts: Mapping a legacy of urbanization in the United States[J]. Applied Geography, 2016, 67:129-139.
- [7]Taniguchi K T, Biggs T W. Regional impacts of urbanization on stream channel geometry: A case study in semiarid southern California[J]. Geomorphology, 2015, 248:228-236.
- [8]黄奕龙, 王仰麟, 刘珍环, 等. 快速城市化地区水系结构变化特征——以深圳市为例[J]. 地理研究, 2008(5):1212-1220.
- [9]江燕, 薛丽芳, 于红学, 等. 近30年来南四湖流域城市化进程中的水系变化分析[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1):135-142.
- [10]孟飞, 刘敏. 高强度人类活动下河网水系时空变化驱动机制分析——以浦东新区为例[J]. 兰州大学学报, 2006(4):15-20.
- [11]田壮壮, 关燕宁, 郭杉, 等. 城市化背景下建成区扩展及其对河网变化的影响——以苏州市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(4):915-924.
- [12]吴月芽, 张根福. 1950年代以来太湖流域水环境变迁与驱动因素[J]. 经济地理, 2014, 34(11):151-157.
- [13]郭子豪. 黄土丘陵沟壑区典型沟道土地整治工程对水系平衡影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2021.
- [14]张凤, 陈彦光, 刘鹏. 京津冀城镇体系与水系结构的时空关系研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3):377-388.

- 
- [15]胡春宏, 张双虎. 长江经济带水安全保障与水生态修复策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1):166-175.
- [16]李景保, 于丹丹, 杨波, 等. 长江荆南三口水系调蓄能力演变及其与水系结构的关联性[J]. 水资源保护, 2019, 35(5):19-26.
- [17]陈昆仑, 许红梅, 李志刚, 等. 快速城市化下的武汉城市暴雨渍水空间特征及发生机制[J]. 经济地理, 2020, 40(5):129-135, 219.
- [18]徐志耀, 刘滨铨. 大湖流域地区生态质量评价及其时空演进——以洞庭湖流域为例[J]. 生态经济, 2017, 33(8):169-172.
- [19]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[J]. 地理学报, 2018, 73(5):789-802.
- [20]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.
- [21]Ji L, Zhang L, Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the Normalized Difference Water Index[J]. Photogrammetric Engineering&Remote Sensing, 2009, 75(11):1307-1317.
- [22]McFeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index(NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7):1425-1432.
- [23]Xu H. Modification of normalised difference water index(NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14):3025-3033.
- [24]Gao B. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 58(3):257-266.
- [25]Valérie Soti, Tran A, Jean-Stéphane Bailly, et al. Assessing optical earth observation systems for mapping and monitoring temporary ponds in arid areas[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2009, 11(5):344-351.
- [26]邢忠, 陈诚. 河流水系与城市空间结构[J]. 城市发展研究, 2007(1):27-32.
- [27]韩龙飞, 许有鹏, 杨柳, 等. 近 50 年长三角地区水系时空变化及其驱动机制[J]. 地理学报, 2015, 70(5):819-827.
- [28]王伟, 阿里木·赛买提, 马龙, 等. 1986—2019 年新疆湖泊变化时空特征及趋势分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4):1300-1314.
- [29]杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010, 45(2):4-6.
- [30]凌红波, 徐海量, 乔木, 等. 1958—2006 年玛纳斯河流域水系结构时空演变及驱动机制分析[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9):1129-1136.

---

[31]赵英杰, 查小春. 渭河下游历史洪涝灾害对农业经济发展的影响及其减灾措施研究[J]. 经济地理, 2013, 33(5):124-130.

[32]汤冰, 刘许生. 环洞庭湖基本农田建设重大工程立项前后[J]. 国土资源导刊, 2010, 7(9):33-35.