

复杂网络视角下城镇化与水资源承载力的耦合关系研究

周芸¹, 冯倩¹, 吴松林¹, 董伟平¹, 付莎莎², 杨平²

(1.江西水利电力大学 水利工程学院, 江西 南昌 330099; 2.江西省水利科学院, 江西 南昌 330029)

摘要: 【目的】揭示水资源承载力与城镇化系统的动态耦合关系及水平, 对解决城镇化进程中水资源供需失衡、水生态退化问题, 构建区域可持续发展的水资源管控体系具有重要实践价值。【方法】本文构建城镇化“人口—社会—经济—生态”四维子系统与水资源承载力“禀赋—利用—管理”三维子系统, 遴选 21 个代表性指标; 采用回归系数与相关系数双重判据识别耦合关系类型, 结合滑动窗口加权网络模型, 从指标关联强度、子系统协同演化、网络模块化三个维度, 解析 2004—2023 年江西省两大系统耦合关系的动态变化规律。【结果】①2004—2023 年, 江西省城镇化与水资源承载力系统经历了“权衡主导且范围逐步扩大—正向协调主导—权衡与负向协调共同主导”的演化模式。②断面水质优良比例是正向协调核心稳定指标, 水利环境投资占比、研究与开发经费占比等为政策响应型协同指标, 其驱动效应高度依赖“经济增长-研发投入-环保投资-生态用水保障”的正向传导链条。③万元 GDP 用水量是全研究周期内持续加剧系统间权衡矛盾的核心制约指标, 也是阻碍两系统协同发展的长期瓶颈。④城镇居民人均日生活用水量与人均 GDP 为负向协调关键指标, 其后期驱动作用显著增强, 需重点管控。【结论】江西省城镇化与水资源承载力系统耦合关系呈阶段性动态演化, 关键指标作用差异显著, 未来需紧扣关键指标演化特征, 实施精准化、前瞻性管控, 以持续提升区域的可持续发展能力。

关键词: 城镇化; 水资源承载力系统; 网络分析; 耦合协调; 水资源管理

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

水资源是区域社会经济可持续发展的基础性战略资源, 受全球气候变化与快速城镇化进程的叠加影响, 水资源短缺、水环境恶化已成为制约区域高质量发展的关键瓶颈^[1-2]。在此背景下, “水资源承载力”概念被广泛关注, 用以衡量区域水资源系统在特定时空条件下支撑人口增长、经济发展与生态安全的能力上限^[3]。尽管学界对水资源承载力的定义尚未统一, 但主流观点可归纳为两类: 一类是从“容量极限”视角, 强调水资源支撑的最大人口与经济规模^[4]; 另一类则从“系统协调”视角切入, 突出水资源与社会、经济、生态子系统之间的动态平衡关系^[5]。二者均表明: 水资源承载力是由多要素、多子系统构成的复杂适应性系统, 其内部各要素间存在非线性、多尺度的耦合关联^[6-7]。

江西省作为长江中下游重要生态屏障与全国粮食主产区, 其城镇化率已由 2004 年的 35.6% 提升至 2023 年的 63.1%, 而同期人均水资源量却从全国均值的 1.2 倍降至 0.8 倍, 水资源保障与城镇化发展的矛盾日益尖锐^[8]。已有研究揭示了江西省城镇化进程中的水资源利用效率分异与阶段性约束特征^[9-11]。但多聚焦于单要素线性关系或子系统耦合协调度测算^[12], 难以揭示城镇化与水资源承载力系统间多维指标间的动态反馈机制与网络关联结构。

传统研究方法如环境库兹涅茨曲线 (EKC)、系统动力学模型及耦合协调度模型, 在刻画此类复杂系统时存在明显局限: EKC 模型仅能反映单一指标对水资源系统的单向影响^[13]; 系统动力学模型虽可模拟系统动态演化, 却难以量化子系统

收稿日期/Received: 2025-12-10

修回日期/Revised: 2026-03-34

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3209005); 江西省水利厅科技项目 (202325ZDKT08)。

第一作者: 周芸 (2000—), 女, 在读硕士研究生, 从事水生态方面的研究。E-mail: 13125242830@163.com。

通信作者: 冯倩 (1981—), 女, 副教授, 硕导, 博士, 从事流域水环境管理与规划研究方面的研究。
E-mail: fengq1981@163.com。

间的互馈路径^[14];耦合协调度模型则因权重设定主观性较强,易掩盖指标层级的关键信息^[15]。网络分析法作为研究复杂系统结构特征的有效工具,可通过节点(指标)与连边(关联关系)的可视化,揭示系统内部多层次、多节点的交互作用模式,其指标如中心性、模块度与聚类系数等已被广泛应用于水资源网络^[16]与城市韧性研究^[17]。

鉴于此,本文将网络分析法引入江西省城镇化与水资源承载力系统研究,构建科学的评价指标体系,结合滑动窗口法与复杂网络理论,系统揭示两大系统耦合关系的动态演化特征与内在作用机制,以期破解城镇化进程中水资源刚性约束、优化区域“以水定城”战略提供新的方法论支撑与实践参考。

1 研究区概况

江西省以鄱阳湖为核心形成“五河汇流”独立水系,水资源总量丰富但时空分布不均,核心问题为开发不足与利用低效并存:2023年,全省水资源开发利用率仅为18.3%,低于全国平均水平(22.9%);同时江西省处于城镇化加速期,如图1所示形成以南昌(2023年城镇化率79.6%)为核心的城镇体系,全省城镇化率达63.1%,但城镇化发展质量仍落后于全国平均水平(2023年全国常住人口城镇化率为66.16%)^[18]。尽管水资源本底条件优越,江西省仍面临工程性缺水与水环境压力的双重挑战,快速城镇化引发的用水结构变化、水生态问题也日益凸显^[19]。该区域集“丰水本底、快速城镇化进程、独立流域系统”三大特征于一身,是探究城镇化与水资源承载力耦合关系的典型研究区,两大系统间要素关联复杂,耦合演化过程具有显著的代表性与研究价值。

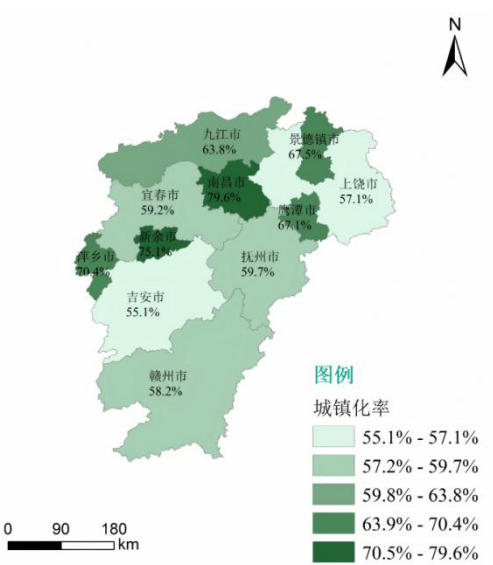


图1 2023年江西省城镇化率示意图
Fig.1 Schematic Map of Urbanization Rate in Jiangxi Province in 2023

2 数据与方法

2.1 指标体系构建

科学构建指标体系是评价城镇化与水资源承载力系统耦合关系的首要环节。现有研究主要有两条技术路径:一是以“压力—状态—响应(Pressure-State-Response, PSR)模型”及衍生框架“驱动力—压力—状态—影响—响应(Driving Force-Pressure-State-Impact-Response, DPSIR)模型”遴选指标,侧重刻画外部胁迫与系统响应的因果链^[20-21];二是从“复杂适应系统”视角出发,将城镇化系统解构为人口、经济、社会、生态四维子系统,水资源承载力系统解构为水资源禀赋、水资源利用、水资源管理三维子系统,筛选指标揭示多要素交互耦合机制^[22]。鉴于后者更能捕捉“城—水”(城镇化与水资源承载力)系统非线性协同演化特征,本文采用第二条路径,结合江西省降水时空不均、“五河一湖”水系独特的自然条件,以及城镇化快速扩张、产业结构梯度转移的社会经济背景,遵循科学性、系统性、代表性与数据可获取性原则,吸纳前人成果^[23],最终形成江西省城镇化与水资源承载力系统耦合水平评价指标体系见表1。依据指标对系统耦合协调的效应方向,进一步区分为正向指标(指标值增加有利于系统)和负向指标(指标值增加抑制系统)。

表1 江西省城镇化与水资源承载力系统耦合水平评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system for coupling level of urbanization and water resources carrying capacity system in

Jiangxi Province

目标层	标准层	指标层	属性	单位
-----	-----	-----	----	----

目标层	标准层	指标层	属性	单位
城镇化水平	人口子系统	城镇人口占比 (f_1)	正向	%
		每万人中有普通高等学校在校学生 (f_2)	正向	人
		城镇人口增长弹性系数 (f_3)	负向	-
	经济子系统	研究与开发(R&D)经费占比 (f_4)	正向	%
		人均 GDP (f_5)	正向	元
		二、三产业占 GDP 比重 (f_6)	正向	%
	社会子系统	每万人中有卫生技术人员 (f_7)	正向	人/万人
		城镇居民人均可支配收入 (f_8)	正向	元
		城镇用水普及率 (f_9)	正向	%
	生态子系统	废水治理设施数 (f_{10})	正向	套
		污水处理率 (f_{11})	正向	%
		排水管道密度 (f_{12})	正向	km/km ²
水资源承载力水平	水资源禀赋	人均水资源量 (h_1)	正向	m ³ /人
		年均降水量 (h_2)	正向	mm
		产水模数 (h_3)	正向	[10 ⁴ m ³ /(km ² ·a)]
	水资源利用	城镇居民人均日生活用水量 (h_4)	负向	L
		万元 GDP 用水量 (h_5)	负向	m ³
		水资源开发利用效率 (h_6)	负向	%
	水资源管理	生态环境用水量 (h_7)	正向	10 ⁸ m ³
		水利、环境和公共设施管理业固定资产投资占比 (h_8)	正向	%
		断面水质优良比例 (h_9)	正向	%

2.2 数据来源

本文所用基础统计数据来源于《江西统计年鉴》（2005—2024）、《江西省水资源公报》（2004—2023）及《中国城市统计年鉴》（2005—2024）。

2.3 研究方法

2.3.1 时间序列的处理

时间序列数据的处理依托 R4.5.0 环境完成。采用滑动窗口技术捕捉 2004—2023 年系统指标关系的动态演化特征,设置 5 年固定窗宽、1 年步长,沿时间轴滚动构建 16 个连续重叠观测窗口。（窗口 1：2004—2008 年,窗口 2：2005—2009 年,⋯）。每个窗口内保留原始数据统计分布特征,依次开展线性回归与皮尔逊相关性检验,刻画指标间耦合强度的时序变化,为后续网络拓扑指标计算提供稳健数据输入。

2.3.2 系统耦合关系类型的划分

为系统刻画城镇化进程与水资源承载力多指标交互作用的演化,本文借鉴已有研究,将指标间的耦合关系归结为三类：正向协调、权衡与负向协调。为实现耦合类型的量化判别,本文联合采用回归系数与相关系数,分别表征指标的发展趋势与指标间的相关程度,通过二者的组合判定实现耦合类型的量化划分。具体的计算公式如下：

1) 回归系数计算。通过指标与窗口序列索引的线性回归可得回归系数 β 。 $\beta>0$ 时,正向指标增长代表系统状态提升,负向指标增长代表系统压力加剧。 $\beta<0$ 时,正向指标下降代表系统状态恶化,负向指标下降代表系统压力缓解。其计算式为：

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$$
 (1)

式中： $\hat{\beta}$ 为回归系数向量; X 为标准化时间向量; y 为窗口内指标观测序列。

2) 相关性分析。采用皮尔逊（Pearson）相关系数的绝对值大小反映关联作用的程度。以（ $P<0.05$ ）为显著性阈值筛选有效关联,排除统计伪相关,确保耦合关系的可信度。相关系数 r_{ij} 在给定期限内的计算式为：

$$r_{ij} = \frac{Cov(X_i, X_j)}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}}$$
 (2)

式中, X_i 、 X_j 分别为指标*i*和指标*j*的序列值; σ_{X_i} 和 σ_{X_j} 分别为对应序列的标准差; $Cov(X_i, X_j)$ 为两序列的协方差。

基于上述分析结果,制定了系统指标间耦合关系类型的划分标准,详见表 2。

表 2 系统指标之间耦合关系类型的划分

Tab.2 Classification of types of coupling relationships between system indicators

回归系数 β	相关系数 r	指标属性组合	判定类型	耦合类型的含义
--------------	----------	--------	------	---------

回归系数 β	相关系数 r	指标属性组合	判定类型	耦合类型的含义
>0	>0	正向, 正向	正向协调	相互适配、相互促进（协同发展）
<0	>0	负向, 负向	正向协调	相互适配、相互促进（协同发展）
任意	>0	正向, 负向	权衡	一个指标的提高引起另一个指标的恶化
>0	>0	负向, 负向	负向协调	存在关联, 但一致趋于坏的方向发展
<0	>0	正向, 正向	负向协调	存在关联, 但一致趋于坏的方向发展
>0	<0	正向, 负向	正向协调	相互适配、相互促进（协同发展）
任意	<0	正向, 正向	权衡	一个指标的提高引起另一个指标的恶化
任意	<0	负向, 负向	权衡	一个指标的提高引起另一个指标的恶化
<0	<0	正向, 负向	负向协调	存在关联, 但一致趋于坏的方向发展

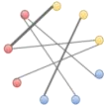
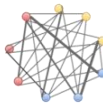
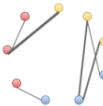
2.3.3 网络构建及网络指标

本文将江西省城镇化—水资源承载力耦合系统抽象为无向加权图 $G=(V,E)$, 其中 V 为水资源承载力9个评价指标和城镇化12个评价指标构成的节点集, E 为节点间经显著性检验后保留的边集。利用 igraph 1.3.0 工具包, 基于5年滑动窗口计算皮尔逊相关系数以生成网络; 边权设为相关系数绝对值（权重越大, 指标间作用越强）, 以不同颜色区分正向协调、权衡、负向协调三类耦

合关系。其中, 节点度表示该指标与系统内其他指标建立的显著关联数量, 而加权节点度^[24]则进一步以相关系数大小为权重, 刻画指标对网络的影响势能。
 为揭示系统的整体组织特征, 选取连通性与模块度两项网络指标, 其公式及含义见表3。二者协同量化城镇化与水资源承载力系统的内在关联结构及功能分异特征, 为解析系统耦合关系的演化规律提供网络层面的支撑。

表3 网络指标的计算方法及含义

Tab.3 Calculation methods and definitions of network indicators

指标名称	计算方法	含义	低水平特征	高水平特征
连通性	以网络连边数与最大可能连边数的比值, 并由连边的强度加权, 连通性 $=\frac{\sum r_{ij} }{n(n-1)/2}$, 其中 n 为节点规模。	高连通性反映指标关联紧密、耦合程度高; 低连通性则说明指标间连接稀疏、耦合程度弱。		
模块度	分析网络聚类结构的核心指标, 通过 igraph 软件 cluster_walktrap 算法 ^[25] 估算。	高模块度表示跨子系统的指标关联少; 低模块度表示跨子系统产生关联多。		

3 结果与分析

3.1 城镇化与水资源承载力系统间的耦合网络演化

构建耦合网络是揭示系统交互结构的基础。本文基于2004—2023年滑动窗口数据, 构建江西省城镇化与水资源承载力系统耦合网络图谱, 以“节点一边”形式直观呈现耦合关系, 从系统间分析三类耦合关系的演化特征, 如图2所示。
 2004—2013年, 如图2(a)、2(b))所示, 江西省城镇化与水资源承载力系统整体耦合程度较低, 指标间显著关联数量少, 权衡关系始终占据主导且覆盖范围呈逐步扩大态势。2004—2008年, 核心冲突集中于多数城镇化指标与万元GDP用水量(h_5)、水利环境公共设施管理业固定资产投资占

比(h_8)之间, 源于城镇化初期粗放型经济模式下单位产出耗水高、环保投入滞后于城镇化扩张; 此阶段仅生态环境用水量(h_7)与部分城镇化指标存在少量正向协调。2009—2013年, 新增城镇居民人均日生活用水量(h_4)、生态环境用水量(h_7)与城镇化指标的权衡关系, 主要因城镇人口集聚推高生活用水刚性需求、经济发展持续挤压生态用水; 同时断面水质优良比例(h_9)与污水处理率(f_{11})首次出现零星正向协调, 水污染治理初步见效。
 2014—2018年, 如图2(c)所示系统转为正向协调主导特征。生态环境用水量(h_7)、水利、环境和公共设施管理业固定资产投资占比(h_8)、断面水质优良比例(h_9)三大水资源管理指标, 与城镇人口占比(f_1)、人均GDP(f_5)、研究与开发

(R&D) 经费占比 (f_4) 等城镇化核心指标形成跨子系统正向协调网络, 仅万元 GDP 用水量 (h_5) 与二、三产业占 GDP 比重 (f_6) 之间存在少量权衡关系, 仍是本阶段制约系统协同的核心矛盾。其核心驱动在于, 2014 年江西获批全国生态文明先行示范区、2016 年入选国家生态文明试验区^{[26][27]}, 政策推动城镇化向高质量转型, 生态与经济城镇化协同推进。此阶段人均 GDP 增长带动研发与水利环保投资同步增加, 既推动产业向低耗水方向升级、持续降低万元 GDP 用水量, 又完善了生态补水等基础设施, 最终形成“城镇化高质量发展—水资源承载力提升”的正向循环; 但受产业结构转型周期长、节水技术落地时滞影响, 万元 GDP 用水量的长期制约作用仍未根本消除。

2019—2023 年, 如图 2(d) 所示系统负向协调关系首次大量涌现, 正向协调关联显著减少, 同时新增多组权衡关系。城镇居民人均日生活用水量

(h_4)、水资源开发利用效率 (h_6) 与多数城镇化指标呈负向协调, 年均降水量 (h_2) 与废水治理设施数 (f_{10}) 亦形成负向协调。其根源在于城镇化推进中生活用水粗放、开发秩序失衡且管控缺位, 叠加区域降水下降导致水资源禀赋与自净能力弱化、治污设施建设滞后, 最终水资源开发利用与污染治理能力随城镇化推进同步退化, 形成显著负向协调效应。新增的权衡关系集中于人均水资源量 (h_1)、年均降水量 (h_2)、产水模数 (h_3) 等水资源禀赋指标与城镇化指标之间, 说明伴随区域城镇化进入加速期, 叠加鄱阳湖流域连续发生特大干旱事件影响^[28], 水资源禀赋对城镇化的约束效应持续增强, 现有管控措施未能筑牢禀赋安全底线与建立前置管控机制, 成为新增瓶颈。同时, 万元 GDP 用水量相关的权衡关系持续存在, 印证区域经济发展仍未摆脱“高耗水、低效率”的粗放模式, 节水管控与产业转型未形成长效约束。

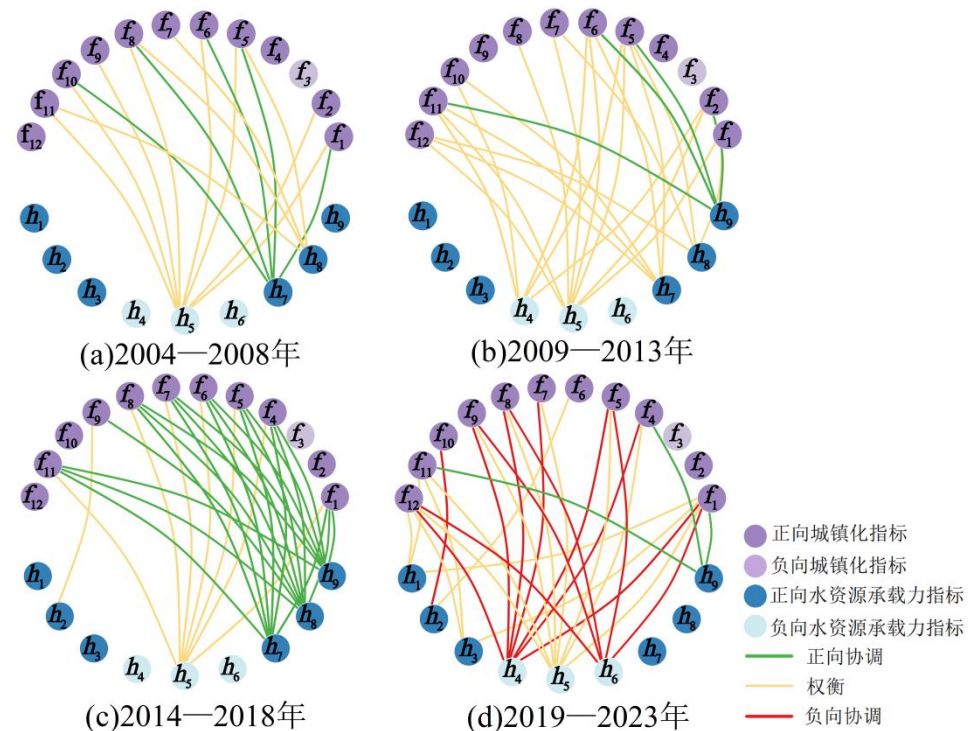


图 2 江西省城镇化与水资源承载力系统交互网络

Fig.2 Interaction network of urbanization and water resources carrying capacity system in Jiangxi Province

3.2 不同耦合关系的特征分析

分析网络整体特征是理解系统演变的关键。本文通过计算耦合关系连通性与模块度, 揭示 2004—2023 年三类耦合关系的动态变化。

如图 3 所示, 展示了三类耦合关系连通性的动态变化。连通性作为量化指标耦合程度的核心参数, 其变化清晰反映了系统耦合的强弱演进: 正向协调关系连通性呈“波动上升—峰值回落”特

征, 2004—2018 年 (窗口 1-12) 逐步攀升, 表明系统正向协调效应持续增强; 2019 年后 (窗口 13) 快速回落, 正向协调显著弱化。权衡关系连通性整体呈“波动下降—反复起伏”态势, 2004—2009 年 (窗口 1-6) 持续下降, 初期系统冲突程度有所缓解; 2009 年后无明显单向趋势, 耦合状态不稳定且缺乏持续性。负向协调关系连通性在 2004—2018 年始终为 0, 耦合程度低, 系统未出现规模化

协同恶化;2019年后(窗口13)快速上升,系统首次出现规模化负向协调关系,耦合程度显著提升。

如图4所示,揭示了正向协调与权衡关系的模块度随滑动窗口变化特征(负向协调2019年前占比极低,不具备统计分析意义)。结果表明,正向协调关系的模块度总体变化趋势与连通性相反,呈波动下降特征,窗口15之后模块度趋近于0;结合网络图谱分析可知,该阶段多个指标更倾向于跨子系统协同发挥正向协调作用,系统正向协调的整体性与稳定性显著提升。结合图2分析可知,权衡关系的关联聚类结构在不同阶段始终分散于城镇化与水资源承载力的各子系统之间,未形成稳定的模块化核心冲突靶点,核心冲突靶点随城镇化进程持续动态迁移。

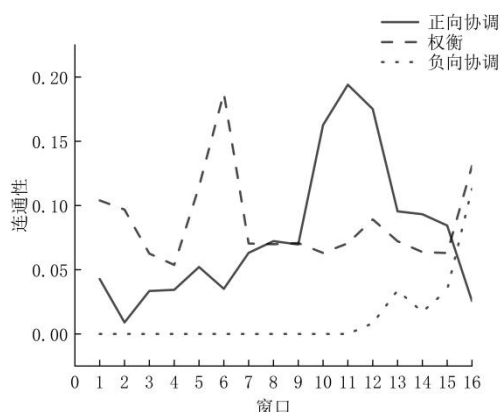


图3 耦合关系连通性随窗口动态变化

Fig.3 Dynamic changes of connectivity of coupling relationships with window

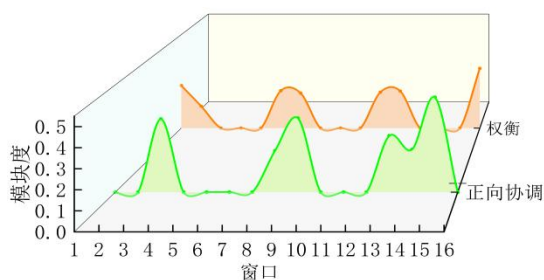


图4 耦合关系的模块度随窗口变化

Fig.4 Modularity of positive coordination and trade-off relationships with window

3.3 耦合关系中关键指标的特征分析

为识别系统核心特征与耦合关系演变的关键驱动指标,基于加权节点度(正向协调/权衡关系最大加权节点度 >3.7 ,负向协调关系最大加权节点度 >1.8 且窗口出现次数 ≥ 4)分析各指标在三类耦合关系中的动态变化,如图5所示。聚焦关键指标改善,能有效驱动两大系统同步提升。

如图5(a)所示,正向协调关系的关键指标集中于城镇化经济子系统与水资源管理领域,其中

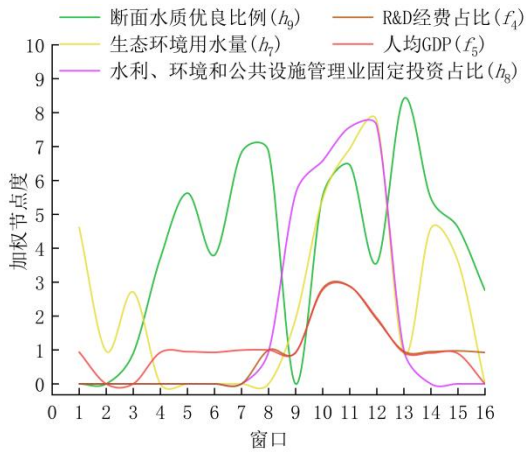
断面水质优良比例(h_9)加权节点度呈多阶段高位波动,仅窗口1-3长期低位、窗口9(2014年生态文明先行示范区政策落地初期)因政策切换出现短暂联动真空,此后快速上升,其驱动效应与水环境治理制度执行强度高度相关,是持续触发跨系统正向协调的核心稳定指标。水利、环境和公共设施管理业固定资产投资占比(h_8)、研究与开发(R&D)经费占比(f_4)、人均GDP(f_5)、生态环境用水量(h_7)4项指标在不同时期的波动趋势高度趋同,窗口8之前,除生态环境用水量在窗口1出现短暂上升后快速回落外,加权节点度均长期趋近于0;窗口8之后同步快速增长,于窗口10-12集中达到各自峰值,峰值过后加权节点度快速下降。而窗口8(对应2014年、2016年省级生态文明政策落地关键期)后同步爆发式增长,于窗口10-12(政策攻坚期)达到峰值后快速回落。4项指标的驱动效应完全绑定“人均GDP增长→研发投入增加→水利环境投资提升→生态用水保障”的正向传导链条,强政策约束下链条打通成为系统转向正向协调的核心动力;窗口12后江西省城镇化率突破60%,生活用水刚性增长挤占生态用水空间,传导链条断裂,4项指标正向驱动效应快速消退。综上,该4项指标为典型政策响应型协同指标,是系统正向协调的“触发加速器”而非稳定锚点,其效应存续高度依赖政策环境与发展阶段。本结论与贾玉博等^[16]的研究一致,其同样指出水利环境投资、R&D经费属政策响应型触发指标,不具备锚点稳定性。

如图5(b)所示,万元GDP用水量(h_5)加权节点度全周期在6.0-8.0高位震荡,无明显长期下行趋势,是制约系统协同发展的长期瓶颈。江西省作为粮食主产区与传统工业省份,高耗水产业规模基数大,单位GDP用水消耗始终是经济发展与水资源保护的核心冲突来源。这与丁萌^[29]关于万元GDP用水量是江西省经济-水资源脱钩核心影响因子的结论一致。城镇人口占比(f_1)、人均GDP(f_5)、二、三产业占GDP比重(f_6)、污水处理率(f_{11})4项指标波动趋势高度趋同。加权节点度整体呈前期窗口1-6(2004-2013年)随城镇化粗放扩张,城镇人口集聚、高耗水产业主导、治污设施滞后导致其与水资源承载力的冲突加剧,加权节点度于窗口5-6达到峰值后快速回落;仅研究末期(窗口15-16)因鄱阳湖流域连续特大干旱导致水资源禀赋下降,出现小幅反弹,其余时段无持续稳定冲突效应。

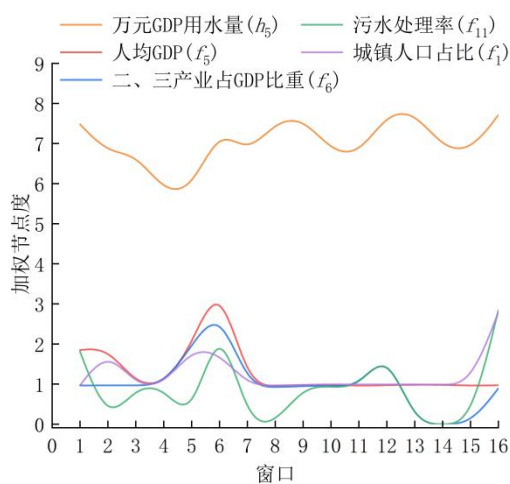
如图5(c)所示,负向协调关系的高加权节点

度指标聚焦“生活用水—经济发展”维度,核心为城镇居民人均日生活用水量(h_4)与人均GDP(f_5),二者变化趋势一致,二者演化呈明显两阶段特征:2019年(窗口12)前加权节点度极低,未形成同步恶化条件;2019年后升至峰值并维持高位,主要源于城镇化后期人口集聚与经济增长推高生活用水刚性需求,叠加极端气候形成“用水增长-资源压力加大”的负向循环。该驱动机理与胡庆芳等^[30]的研究结论高度契合,其证实城镇化后期生活用水刚性增长叠加极端水文事件会显著加剧区域水资源供需矛盾。

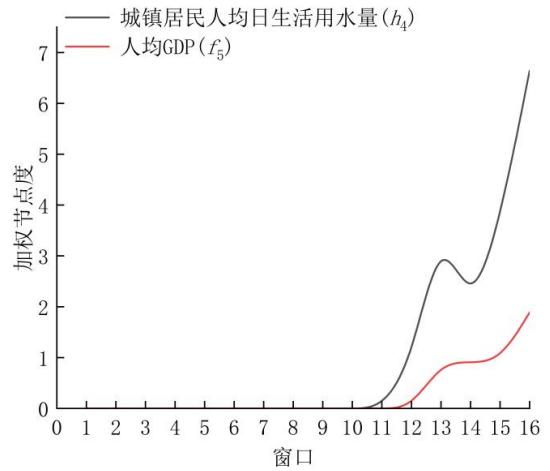
其中人均GDP(f_5)是贯穿三类耦合关系的核心指标,其作用方向随发展阶段动态转化,表明经济发展与水资源承载力的关系并非线性,而是呈现多阶段演化特征,需根据不同阶段制定差异化管控策略。



(a) 正向协调



(b) 权衡



(c) 负向协调

图5 关键指标的加权节点度随窗口的变化

Fig.5 Weighted node degree of key indicators with window

4 结论与展望

4.1 结论

1) 2004—2023年,江西省城镇化与水资源承载力系统的耦合关系经历“权衡主导且扩增→正向协调主导→权衡与负向协调同步主导”的演化,呈现出复杂多变的网络结构形态,指标间正向协调关系的耦合程度呈“前期波动增强、2019年后持续减弱”的特征,而权衡关系的耦合程度呈波动起伏特征,耦合状态不稳定、缺乏持续性,负向协调水平仅在研究末期集中凸显。此外,系统正向协调关系的模块度总体呈波动下降的趋势并在2018年后趋于0,表明具有正向协调关系的指标倾向于跨子系统协同发挥正向作用,系统正向协调的整体性与稳定性显著提高。

2) 正向协调关系的核心驱动指标为断面水质优良比例,以及水利、环境和公共设施管理业固定资产投资占比、研究与开发(R&D)经费占比等政策响应型指标,指标改善可带动系统全域优化,其协同驱动效应高度依赖正向传导链条的完整性,是系统协同跃升的“触发加速器”,但不具备长期稳定性;万元GDP用水量是权衡关系中全周期高位存在的核心制约指标,是制约城—水系统协同发展的长期瓶颈,反映区域经济发展始终未摆脱高耗水粗放模式,而人口、产业类指标的冲突效应仅在城镇化粗放扩张期集中凸显;负向协调关系的核心诱因是城镇居民人均日生活用水量与人均GDP形成的负向协调效应,是城镇化后期水资源供需矛盾的集中体现,其负面驱动作用在研究后期显著增强,是未来水资源管控的核心靶点。

4.2 展望

未来可从三个方面进一步深化研究：一是开展市域尺度的空间分异研究，揭示江西省不同城镇化水平区域“城—水”耦合关系的空间差异，构建差异化的管控体系；二是纳入气候变化、流域上下游联动等外部因子，完善系统驱动机制分析，模拟未来不同发展情景下系统耦合关系的演化趋势；三是结合“双碳”目标、长江经济带高质量发展等国家战略，进一步探究城镇化、水资源承载力与低碳发展的协同机制，为区域可持续发展提供更全面的理论支撑。

5 措施建议

1) 聚焦核心约束，破解长期发展瓶颈。针对万元 GDP 用水量长期高位、经济发展依赖高耗水模式的突出问题，严格实行水资源总量和强度双控，将万元 GDP 用水量下降目标纳入地方政府绩效考核硬约束，分行业制定强制性用水定额标准。推进高耗水工业节水改造与落后产能淘汰，培育低耗水高附加值产业；推广农业高效节水灌溉，完善灌排工程体系。推行用水权市场化交易，建立节水长效机制，从源头消解经济与水资源保护的长期冲突。

2) 针对城镇居民人均日生活用水量攀升问题，推进城镇供水管网老旧改造降漏损；完善阶梯水价制度，强化节水宣传，引导绿色生活方式；结合人口集聚特征，合理规划供水设施，避免水资源过度开发。

3) 以“四水四定”为刚性约束，加大水利环境与节水技术研发投入，完善污水治理与生态补水设施，建立生态用水动态保障机制；加强跨区域智慧水利调度，提升极端气候应对能力。

参 考 文 献

- [1] 陈曦, 王建伟, 季建. 成都市城市发展与水资源利用关系分析[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(9):22-27. [Chen Xi, Wang Jianwei, Ji Jian. Analysis of the relationship between urban development and water resources utilization in Chengdu City[J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(9):22-27.]
- [2] Pierrat É, Laurent A, Dorber M, et al. Advancing water footprint assessments: combining the impacts of water pollution and scarcity[J]. The Science of the total environment, 2023, 870:161910-161910.
- [3] 丁晶, 覃光华, 李红霞. 水资源设计承载力的探讨[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(4):1-6.
- [4] Ding Jing, Tan Guanghua, Li Hongxia. Discussion on Design Carrying Capacity of Water Resources[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2016, 37(4):1-6.]
- [5] 冉钊, 刘彦随, 高建华. 黄河中下游地区人水关系多尺度演化及其影响因素[J]. 资源科学, 2025, 47(3):572-586. [Ran Zhao, Liu Yansui, Gao Jianhua. Multiscale evolution of human-water relationship and its influencing factors in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Resources Science, 2025, 47(3):572-586.]
- [5] 李金铠, 孟慧红, 魏伟. 人水和谐视角下的黄河流域经济-文化-生态和谐发展水平评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版). 2023, 44(6):26-35. [LI Jinkai, Meng Huihong, Wei Wei. Evaluation of the harmonious development level of economy-culture-ecology in the Yellow River Basin from the perspective of human-water harmony[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2023, 44(6):26-35.]
- [6] Zhang Qianrong, Hazirah B, Wang Yao, et al. Coupling coordination and sustainability among water resource carrying capacity, urbanization, and economic development based on the integrated model[J]. Frontiers in Environmental Science, 2025, 13:1563946-1563946.
- [7] Li Zhaoyang, Cao Lei, Wang Shuxia, et al. Spatiotemporal evolution and coupling coordination of multi-objective and multi-dimensional water resources carrying capacity[J]. Ecological Indicators, 2025, 178:113965-113965.
- [8] 邵薇薇, 刘海振, 周祖昊, 等. 南方地区城镇化、工业化进程中农业用水演变规律分析[J]. 水利经济, 2016, 34(2):11-15, 35, 83. [Shao Weiwei, Liu Haizhen, Zhou Zuha, et al. Evolution rules of agricultural water during urbanization and industrialization in south areas of China[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34(2):11-15, 35, 83.]
- [9] 吴向东, 许新发, 成静清, 等. 江西省水资源利用效率时空演变及其影响因素[J]. 人民长江, 2021, 52(12):92-98, 121. [Wu Xiangdong, Xu Xinfa, Cheng Jingqing, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of water resources utilization efficiency in Jiangxi Province[J]. Yangtze River, 2021, 52(12):92-98, 121.]
- [10] Chen Yasi, Chen Zhu an, Liu Ziqiang, et al. Prediction of trade-offs and synergies and analysis of driving forces of ecosystem services in Jiangxi, China[J]. Environment, Development and Sustainability, 2025:1-24.

- [11] 金巍. 时空差异下水资源对城镇化进程的约束效应研究[J]. 南京邮电大学学报(社会科学版), 2020, 22(6):89-102. [Jin Wei.Constraint effect of water resource on urbanization under spatial and temporal differences[J].Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Social Science Edition),2020,22(6):89-102.]
- [12] 粟皎悦, 陈万林, 徐志芬, 等. 都江堰灌区水-能源-粮食系统耦合协调分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(6):32-40.[Su Xiaoyue,Chen Wanlin,Xu Zhifang,et al.Analysis on the coupling coordination of water-energy-food system in Dujiangyan Irrigation District[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2024,45(6):32-40.]
- [13] 刘佳琪, 董怡, 许明军, 等. 武汉市废水排放EKC曲线及驱动效应研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(2):89-94. [Liu Jiaqi,Dong Yi,Xu Mingjun,et al.Study on EKC curve and driving effect of wastewater discharge in Wuhan[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2022,43(2):89-94.]
- [14] Pluchinotta I,Pagano A,Vilcan T,et al.A participatory system dynamics model to investigate sustainable urban water management in Ebbsfleet Garden City[J].Sustainable Cities and Society,2021,67:102709.
- [15] Yuan Yana,Wei Shuping,Wan Dongqi,et al.A study of land-economy-society-ecology coordination in the Yangtze River Delta based on coupled coordination degree model[J].International Review of Economics and Finance,2024,95:103474-103474.
- [16] 贾玉博, 粟晓玲, 褚江东, 等. 基于复杂网络的水资源承载力系统指标间耦合关系研究: 以甘肃省为例[J].湖泊科学, 2025, 37(2):600-611. [Jia Yubo,Su Xiaoling,Chu Jiangdong,et al.Coupling relationship between indexes of water resources carrying capacity system based on complex network:a case study of Gansu Province [J].Journal of Lake Sciences,2025,37(2):600-611.]
- [17] Zhao Zeyu,Zhou Xiaoshan,Zheng Yuhan,et al.Enhancing infrastructural dynamic responses to critical residents' needs for urban resilience through machine learning and hyper network analysis[J].Sustainable Cities and Society,2024,106:105366.
- [18] 江西省水利厅. 江西省水资源公报(2023 年)[R]. 南昌: 江西省水利厅, 2024.
- [19] 朱越浦. 江西省城镇化建设质量评价与提升研究[D]. 南昌大学, 2016. [Zhu Yuepu.The Research on Evaluation and Improvement of the Quality of Urbanization of Jiangxi Province[D].Nanchang University,2016.]
- [20] 刘英杰, 丁静媛, 薛智文. 基于云模型与PSR模型的长江三角洲水资源承载力评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(2):42-49. [Liu Yingjie, Ding Jingyuan, Xue Zhiwen.Evaluation of water resources carrying capacity of the Yangtze River Delta based on Cloud model and PSR model[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)2021,42(2):42-49.]
- [21] Gao Mengmeng,Yang Nan,Wang Yi,et al.Research on the Evaluation Method of Urban Water Resources Resilience Based on the DPSIR Model:A Case Study of Dalian City[J].Water,2025,18(1):72-72.
- [22] Andreas P Z.Floodplains and Complex Adaptive Systems—Perspectives on Connecting the Dots in Flood Risk Assessment with Coupled Component Models[J].Systems,2018,6(2):9.
- [23] 章恒全, 蔡晓莹, 张陈俊. 城镇化进程对水资源利用效率影响的实证研究[J]. 管理现代化, 2020, 40(1):49-52. [Zhang Hengquan,Cai Xiaoying,Zhang Chenjun.An empirical Study on the Impact of Urbanization on Water Resource Utilization Efficiency[J].Modernization of Management,2020,40(1):49-52.]
- [24] Felipe-Lucia M R,Soliveres S,Penone C,et al.Land-use intensity alters networks between biodiversity,ecosystem functions,and services[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2020,117(45):28140-28149.
- [25] Soumajit P,Prishni R,Raphael T,et al.Multilayer Louvain:a modularity-based community detection algorithm for multilayer networks[J].Knowledge and Information Systems,2025,68(1):14-14.
- [26] 国家发展和改革委员会, 财政部, 国土资源部, 等. 关于印发江西省生态文明先行示范区建设实施方案的通知: 发改环资〔2014〕1667 号[A].2014-08-04.
- [27] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 国家生态文明试验区(江西)实施方案: 厅字〔2016〕34 号[A].2016-08-22.
- [28] 张奇, 薛晨阳, 夏军. 鄱阳湖极端干旱的影响、成因与对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12):1894-1902. [Zhang Qi,Xue Chenyang,Xia Jun.Impacts,contributing factors and countermeasures of extreme droughts in Poyang Lake[J].Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2023,38(12):1894-1902.]
- [29] 丁萌. 江西省水资源利用与经济发展脱钩关系分析[D]. 江西农业大学, 2022. [Ding Meng.Analysis on the decoupling relationship between water resources utilization

- n and economic development in Jiangxi[D].Jiangxi Agricultural University,2022.]
- [30] 胡庆芳, 张建云, 金君良, 等. 城镇化水平衡效应与城市水安全韧性提升研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(6):13
- 1-139.[Hu Qingfang,Zhang Jianyun,Jin Junliang,et al. Water Balance Effect of Urbanization and Countermeasures for Enhancing Urban Water Security Resilience [J].Strategic Study of CAE,2024,26(6):131-139.]

Coupling Between Urbanization and Water Resources Carrying Capacity from a Complex Network Perspective

ZHOU Yun¹, FENG Qian¹, WU SongLin¹, DONG WeiPing¹, FU ShaSha², YANG Ping²

(1. Jiangxi University of Water Resources and Electric Power Hydraulic Engineering, NanChang 330099, China; 2. JiangXi Academy of Water Science and Engineering, NanChang 330029, China)

Abstract: **【 Objective 】** Water resources carrying capacity (WRCC) represents a fundamental, non-negotiable constraint on sustainable urbanization. Quantifying the dynamic coupling and interaction intensity between WRCC and urbanization systems is critical for addressing pervasive water supply-demand imbalances and aquatic ecosystem degradation, and informing evidence-based sustainable regional water management. **【 Method 】** We developed a four-dimensional urbanization subsystem (population-society-economy-ecology) and a three-dimensional WRCC subsystem (endowment-utilization-management), and curated 21 representative indicators. We used dual regression-correlation criteria to classify distinct coupling relationship types. Integrating this classification approach with a sliding window weighted network model, we characterized the 2004-2023 coupling dynamics in Jiangxi Province across three dimensions: indicator correlation intensity, subsystem co-evolution, and network modularity.

【 Result 】 (1) The urbanization-WRCC system in Jiangxi underwent a clear three-stage evolutionary trajectory: "trade-off dominance with expanding scope → positive coordination dominance → co-dominance of trade-off and negative coordination." (2) The proportion of water sections with excellent water quality emerged as the most robust and stable indicator of positive coordination. Policy-responsive synergy indicators (water conservancy and environmental investment ratio, R&D expenditure intensity) exerted synergistic effects mediated by the causal chain of "economic growth → R&D investment → environmental protection investment → ecological water security." (3) GDP water intensity remained the dominant, persistent constraint that consistently exacerbated inter-system trade-offs and impeded synergistic development throughout the study period. (4) Urban per capita daily domestic water consumption and per capita GDP were key negative coordination indicators, whose driving effects increased markedly in the later study period and thus warrant targeted regulatory intervention. **【 Conclusion 】** Urbanization-WRCC coupling in Jiangxi exhibits pronounced phased dynamic evolution, with key indicators playing divergent and context-dependent roles. Effective future management must be tightly coupled to the evolutionary characteristics of these key indicators, and deploy precise, proactive management strategies to advance long-term regional sustainable development.

Keywords: urbanization; water resources carrying capacity system; network analysis; coupling coordination; water resources management