

迈向时空均衡：赣江绿色流域水平动态演化 与多因子驱动^{*}

贾志昇^{1,2)}, 王宏洋²⁾, 张明慧²⁾, 段诗昊^{2,3)}, 马丽⁴⁾, 洪培^{2,3)}, 徐睿²⁾, 蒲生彦^{1)†}

(1)成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川成都; 2)中国环境科学研究院, 环境基准标准与风险管控全国重点实验室, 北京; 3)安徽师范大学生态与环境学院, 省部共建皖江流域退化生态系统的恢复与重建协同创新中心, 安徽芜湖; 4)天津市生态环境监测中心, 天津)

摘要 在全球变暖与生态退化叠加下, 构建“智简高效”的绿色流域评估体系已成为可持续发展核心议题. 本研究以赣江流域为例, 构建了一个涵盖“时序-空间-时空”三维的分析框架. 在基于 AHP-EWM 组合赋权法构建综合指数, 对 2003—2022 年江西省 11 地市的绿色流域水平进行测度的基础上, 综合运用趋势检验、空间自相关与收敛性分析, 揭示了 GWL 的时空演变特征, 并采用时空地理加权回归模型, 辨识了“人-水-能-碳-绿-城”多维因子的驱动机制. 结果表明: 时序上, GWL 持续上升且无突变, 2016 年起由缓慢增长进入快速增长阶段; 空间上, 呈南高北低, 局部以“高-低”“低-高”聚类为主, 区域差异呈“N”型下降, 空间不均衡收敛; 时空上, GWL 重心向西南迁移, 分布先聚后散, 11 市 GWL 由 2003 年 4 市中值、7 市低值至 2020 年全域进入 0.6~0.8 高值区间, σ 、 α 、 β 三重收敛证明 11 市 GWL 正迈向时空均衡; 驱动机制上, 6 要素边际效应相继越顶衰减, 人口与碳生产力先后由正转负, 水、森林边际红利迅速缩减, 能源正向效应扩散放缓, 城镇化效应已过拐点趋零. 研究结论可为赣江绿色流域高品质建设提供历史借鉴与精准施策依据, 也为其他省份构建绿色流域提供方法论参考.

关键词 绿色流域; 综合评价; 时序演化; 空间格局; 时空耦合; 驱动机制

中图分类号 TV213.4;X24;F127

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2025178

0 引言

面对全球变暖与生态恶化情形, 联合国深刻认识到流域绿色发展的重要性, 制定了密切相关的可持续发展目标(SDGs), 如清洁水的 SDG6 和包含水电在内的清洁能源 SDG7^[1]. 在此背景下, “绿色流域”概念应运而生, 强调生态系统与社会经济融合发展^[2]. 构建绿色流域是国内学者针对流域治理现状, 在清洁小流域实践研究基础上, 融入人水和谐理念提出的进一步设想^[3]. 2023 年, 曲久辉院士从视距内、视距外两方面提出了绿色流域的基本特征, 同时国际上也有如法国塞纳河、韩国清溪川、美国奥农达加湖、英国泰晤士河等绿色流域建设案例, 它们共同印证了绿色流域的基本特征^[4]. 2024 年, 许继军等^[3]对绿色流域构建的必要性与实现路径进行了探讨, 并归纳出绿色流域是以人水和谐为核心的综合体系, 通过现代化管理, 在保障水安全与维护生态健康的同时, 推动低耗低碳低污染的社会经济发展, 是流域尺度实现可持续发展

的重要途径. 这一理念与“十四五”以来国家力推的“减污、降碳、扩绿、增长”四维协同战略高度契合, 要求实现环境、气候、生态、经济四维协同^[5-6]. 因此, SDGs 为全球发展提供了宏观指引, 但具体针对我国现状与实际战略路线需要构建一套整合四维目标的综合评价体系, 以便于科学度量绿色流域水平、识别局部短板、优化构建路径.

为科学度量与推进绿色流域建设, 相关评价研究不断演进, 历经“水质单指标”^[7]到“水-生态双指标”^[8]最后到“水-生态-社会经济三维框架”^[9]的演进. 国际上, 自然解决方案(NBS)^[10]、绿色基础设施(GI)^[11]与生态系统服务(ES)^[12]研究已集成遥感、水文模型和成本-效益分析, 在静态水平与空间异质性层面形成较为成熟的方法体系^[13]. 然而, 上述研究多聚焦于单一截面或空间回归, 缺乏对流域评价结果的“时序-空间-时空”三维特征全景测度. 国内方面, 学者围绕长江、黄河等流域构建了涵盖水资源^[14]、水环境^[15]、水生态与社会经济^[16]的综合评价体系, 并开展情景模

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3205600)

[†] 通信作者: 蒲生彦(1981—), 男, 博士, 教授. 研究方向: 跨介质污染协同防治. E-mail: pushengyan@cdut.edu.cn

收稿日期: 2025-09-23

拟,但普遍存在 3 个方面的不足:1)既有流域研究对污染治理、碳减排、生态保护与经济增长的评估多是单一或两两组合的,缺乏一套综合衡量“减污、降碳、扩绿、增长”四维目标的绿色流域评价指标体系;2)在绿色流域评价研究中尚未形成一套科学的“时序-空间-时空”一体化评价分析框架,一定程度上限制了评价结果时空机制的全面解析;3)驱动机制研究大多仍停留于经典面板回归,对时空驱动机制关注不足。

综上,本文围绕“绿色流域如何科学进行全景测度分析”这一科学问题,以 2003—2022 年赣江流域为例,构建对齐 SDGs 的“减污、降碳、扩绿、增长”四维指标体系,整合“时序-空间-时空”三维九级分析框架全景测度绿色流域水平,并结合时空地理加权回归模型(GTWR)进一步揭示“人-水-能-碳-绿-城”6 要素对绿色流域水平的时空驱动机制。本文的边际贡献在

于:一方面,通过“时序-空间-时空”三维九级框架的系统性实证,深化并丰富了流域尺度下的时空均衡理论,使其在解释多要素驱动的绿色发展格局时更具说服力;另一方面,所构建的指标与 GTWR 驱动分析模型,为量化流域发展的均衡性与动态性提供了可复制的方法论工具,兼具理论与实用价值。

1 材料与分析

1.1 研究区概况

赣江是鄱阳湖最大水系,也是长江 8 大支流之一,自南向北纵贯江西,干流全长 766 km,流域面积 8.35 万 km²,占江西省面积的 48.5%,是江西省经济发展重要引擎、江西省高质量发展生态经济带^[17]。鉴于赣江流域在江西省的重要定位,本文将研究区域扩展至江西省全域 11 个地级市(图 1)。

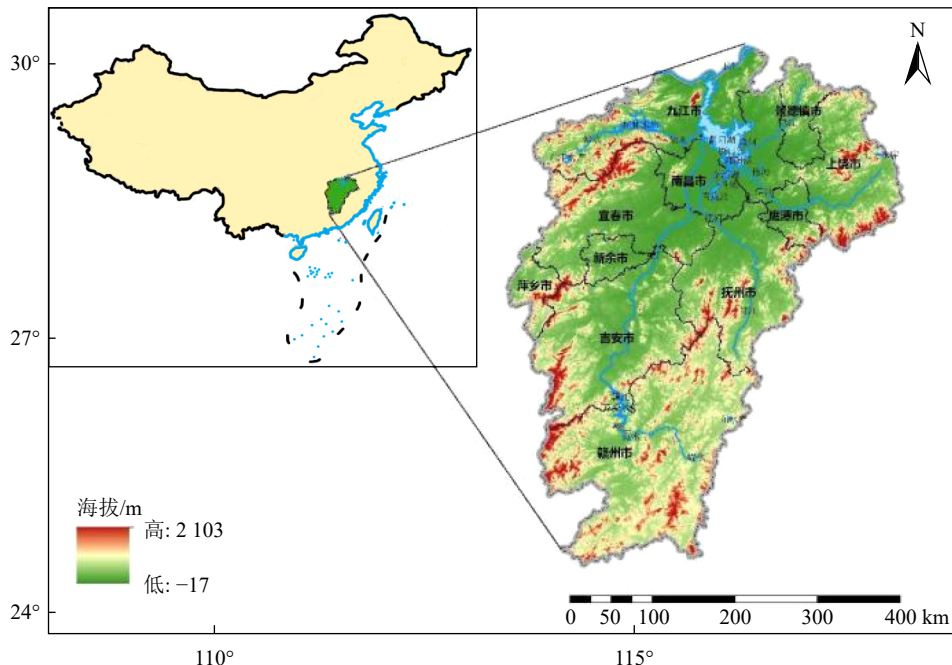


图 1 研究区域行政区划及水系图

江西省位于中国东南部,长江中下游南岸(北纬 24°29′~30°04′,东经 113°34′~118°28′)。地貌呈“三向环山、北口敞通”盆地状,属亚热带湿润季风气候,水热同期。下辖南昌、九江等 11 个地级市,2024 年全省 GDP 达 3.42×10^4 亿元,人口 4 502.01 万,人类活动密度北高南低。研究区域存在高能耗行业集中、林分结构单一脆弱、矿区废弃地聚集风险大以及污洪叠加频发等问题,急需摸清绿色流域水平,以此采取合理方案,推动美丽江西高品质建设。

1.2 多维评价指标体系

结合《美丽江西建设规划纲要(2022—2035 年)》、

《江西省重点流域水生态环境保护规划》等跨部门纲领^[18]及绿色流域基本特征^[19],赣江绿色流域构建锚定“减污、降碳、扩绿、增长”4 目标,指标遴选上遵循政策契合、数据可获、时空可比 3 项原则,以 4 目标作为二级指标构建指标体系(表 1)。

减污维度遵循“水-气-固”污染介质的“源-汇”迁移路径,共选取 6 项指标,形成“排放量-达标率”闭环。降碳维度从能源、CO₂ 与气温 3 环节提取 4 项三级指标,完整覆盖“能源消耗-碳排放-气候反馈”碳转移路径^[20],其中年均气温指标作为对 CO₂ 排放在环境中的反馈,且其升高将意味降碳效果的不佳。扩绿维度遴

选代表人文、城市、自然以及水域扩绿的 4 项指标, “创新驱动-结构升级-成果共享”逻辑, 遴选 5 项指标, 兼顾社会共享、景观结构与生态功能, 增长维度遵循 协同量化“创新、绿色、普惠、最低”4 重增长质量。

表 1 赣江绿色流域多维评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	计算	单位	属性
赣江绿色 流域水平	减污	水污染排放当量	生活COD排放量/1+生活氨氮排放量/0.8	t	负向
		地表水达到或好于Ⅲ类水体比例	水质达到或优于Ⅲ类的国控地表水环境监测断面数/断面总数×100%	%	正向
		大气污染排放当量	工业烟粉尘排放量/2.18+工业二氧化硫排放量/0.95+工业氮氧化物排放量/0.95	t	负向
		空气质量优良率	AQI达到或优于国家质量二级标准的时间/总时间×100%	%	正向
		一般工业固体废物产生量	—	t	负向
		一般工业固体废物综合利用率	一般工业固体综合利用量/(当年固体废物产生量 + 综合利用往年贮存量)×100%	%	正向
	降碳	每万元GDP能源消耗	能源消耗总量/GDP	t/万元	负向
		清洁能源消耗占比	(电能消耗量+天然气消耗量)/能源消耗总量×100%	%	正向
		每万元GDP二氧化碳排放量	二氧化碳排放量/GDP	t/万元	负向
		年均气温	—	℃	负向
	扩绿	人均公园绿地面积	公园绿地面积/年均人口数	m ² /人	正向
		建成区绿化覆盖率	建成区绿化面积/建成区面积×100%	%	正向
		自然绿地覆盖率	(森林面积+草原面积+灌木面积)/行政区划面积×100%	%	正向
		水域面积保留率	水域面积/参考年水域面积×100%	%	正向
	增长	科学技术支出占比	科学技术支出占比=科学技术支出/一般公共预算支出×100%	%	正向
		第三产业增加值占比	第三产业增加值 /GDP×100%	%	正向
		人均GDP	人均GDP=GDP/年均人口数	万元/人	正向
		低收入水平	政府规定的最低工资标准	元/月	正向
		基本服务开支比例	(教育支出+卫生工作支出+社会保障和就业支出)/一般公共预算支出×100%	%	正向

1.3 研究方法

具体研究方法及技术路线见图 2。

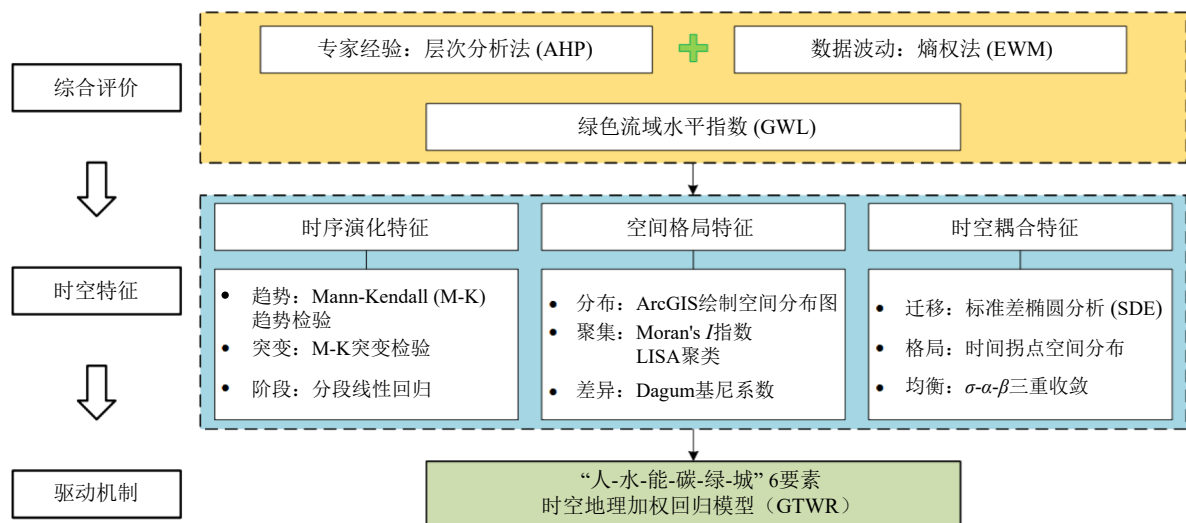


图 2 技术路线

1.3.1 绿色流域水平综合评价方法

为兼顾先验经验与数据变异, 本文采用“AHP-

EWM”主客观耦合框架。首先构建专家判断矩阵, 提炼实际经验下的主观权重; 继而对指标数据离散度进

行信息熵计算,得到数据驱动的客观权重;最后以加法合成法融合生成组合权重(表 2),加权求和得到绿色流域水平指数(GWL)。综合赋权并非简单地“平均”,而是为了克服单一赋权的固有缺陷:主观赋权可

能导致评价结果过于理想化,脱离各地实际发展差异的现状。客观赋权则可能完全被数据主导,忽略了绿色发展

表 2 赣江绿色流域多维评价指标权重

					%			
一级指标	二级指标	客观权重	主观权重	综合权重	指标层	客观权重	主观权重	综合权重
赣江绿色 流域水平	减污	11.15	36.77	23.96	水污染排放当量	1.98	8.56	5.27
					地表水达到或好于Ⅲ类水体比例	0.89	8.68	4.79
					大气污染排放当量	2.08	6.80	4.44
					空气质量优良率	0.91	4.13	2.52
					一般工业固体废物产生量	1.56	3.92	2.74
					一般工业固体废物综合利用率	3.73	4.68	4.21
	降碳	19.19	25.60	22.40	万元GDP能源消耗	1.09	5.12	3.11
					清洁能源消耗占比	15.02	10.15	12.58
					万元GDP二氧化碳排放量	1.16	8.37	4.77
					年均气温	1.92	1.95	1.93
	扩绿	20.18	27.63	23.90	人均公园绿地面积	12.53	3.99	8.26
					建成区绿化覆盖率	1.99	3.88	2.93
					流域水域面积保留率	1.52	8.98	5.25
					自然绿地覆盖率	4.14	10.77	7.46
	增长	49.49	10.00	29.74	科学技术支出占比	14.38	2.77	8.57
					第三产业增加值占比	6.74	2.12	4.43
					人均GDP	12.54	1.99	7.27
					低收入水平	12.05	1.81	6.93
					基本服务开支比例	3.78	1.31	2.54

本研究最终赋权结果既包含了专家对绿色流域目标导向的价值判断,也尊重了各地市发展现状的客观事实。它有效地调和了“应然”与“实然”之间的矛盾,使得最终的评价体系合理平衡主观意愿与客观数据差异,从而得到更为稳健和具有现实解释力的综合评价结果。

1.3.2 时序演化特征分析方法

时序演化特征分析遵循“趋势-突变-阶段”三阶段递进思路:首先以 M-K 趋势检验识别 2003—2022 年江西省 11 地市 GWL 的显著性升降;继而运用 M-K 突变检验锁定潜在变点,为阶段划分提供统计依据;最后分段线性回归以 2016 年为界分段拟合斜率,量化“缓慢增长”与“快速增长”2 个阶段速率变化,从而解析 GWL 的时序演化特征。值得注意的是,以 2016 年为界是基于“趋势”部分绿色流域水平时序变化图的观察、“十二五”时期到“十三五”时期的重大政策转折以及后续分段拟合结果验证的共同结论。

1.3.3 空间格局特征分析方法

空间格局特征遵循“分布-聚集-差异”三级逻辑

分析:首先基于 ArcGIS 10.8 刻画 2003—2022 年的 GWL 空间分布;然后全局 Moran’s *I* 分析 GWL 全局空间自相关,判定整体聚集模式;局部 Moran’s *I* 与 LISA 聚类识别高-高、高-低、低-高、低-低 4 类局域空间关联;最后引入 Dagum 基尼系数,计算各城市间总体差异,并量化各城市与全省整体的偏离度,从而完整揭示 GWL 的空间分布、聚集与差异。值得说明的是,本研究利用 Dagum 基尼系数,旨在精细识别影响 GWL 空间差异的关键地市。首先,将江西省 11 个地市每个视为一个独立组,此时总体基尼系数可完全分解为子群间的差异,用以精确度量城市间的总体不平等程度。继而,为揭示单个城市在总体差异格局中的角色,本研究定义并计算了个体相对差异指数,即某一城市与所有其他城市间基尼系数的均值。该指数量化了特定城市与流域整体平均水平的偏离度;指数越高,表明该城市的发展水平越显异常,是导致区域空间不均衡的潜在不稳定因素。这一处理方法,充分发挥了 Dagum 方法在比较组间差异上的优势,并深化了对差异内部结构的剖析^[21]。

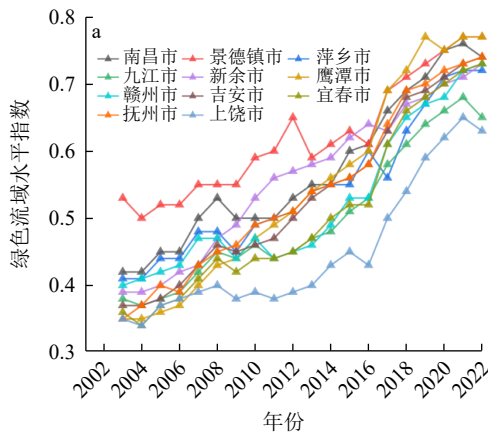
1.3.4 时空耦合特征分析方法

时空耦合特征分析遵循“迁移-格局-均衡”三阶逻辑: 首先利用标准差椭圆(SDE)刻画 GWL 重心迁移轨迹、分布长轴与扩散情况^[22], 识别 GWL 的时空迁移特征; 继而基于 Arc GIS 软件刻画时间拐点的空间分布图, 以点代线分析时空格局演变; 最后以 σ - α - β 三重收敛模型联合验证 GWL 迈向时空均衡的完整轨迹^[23]. 其中, SDE 优势在于能以直观的几何形式(中心、转角、长短轴)揭示 GWL 高值区在空间上的主导方向、聚集程度及扩张/收缩态势. 例如, 长轴方向指示 GWL 高值区的延伸走廊, 短轴指示其分布范围, 重心移动轨迹反映发展热点的空间转移. 其局限性在于对异常值敏感, 且主要描述总体趋势, 不揭示局部异质性. 本研究通过绘制多年份 SDE 序列, 动态展示 GWL 时空迁移路径. 引用 σ - α - β 三重收敛模型是为了系统检验 GWL 是否存在向均衡状态发展的时空收敛趋势, σ 收敛关注绝对差异是否随时间缩小; α 收敛关注低值区 GWL 增长率是否高于高值区; β 收敛直接检验初始水平与增长率之间的负相关关系, 是收敛假说的核心检验. 优势在于构成了一个严谨的“绝对差异-相对增长-统计验证”的证据链, 可以全面评估区域协调发展的动态. 其局限性在于对数据平稳性有要求, 且收敛结论具有时段特定性^[24].

1.3.5 时空地理加权回归模型

GTWR 是一种时空回归模型, 在地理加权回归基础上融入时间属性, 能同时考虑时间和空间 2 个参数, 以提供更加准确的结果^[25]. 研究以 2003—2022 年江西省 11 地市数据, 解析“人-水-能-碳-绿-城”6 要素的局域驱动机制. 模型公式为

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i, t_i) + \sum_{k=1}^K \beta_k(\mu_i, \nu_i, t_i) X_{ik} + \epsilon_i,$$



式中: Y_i 是第 i 个观测的 GWL; (μ_i, ν_i, t_i) 表示第 i 个 GWL 的时空坐标; X_{ik} 是第 i 个观测的第 k 个解释变量(人口密度、水生产力、能源生产力、碳生产力、森林覆盖率、城镇化率); $\beta_0(\mu_i, \nu_i, t_i)$ 是截距项, $\beta_k(\mu_i, \nu_i, t_i)$ 是第 k 个解释变量随时空变化的局部回归系数; ϵ_i 是误差项, 假设为独立同分布的随机变量. 通过高斯核函数自适应带宽选择, GTWR 可精确揭示 6 要素在不同城市与年份的边际贡献方向与强度, 为绿色流域差异化调控提供精准依据.

1.4 数据来源与处理

研究数据涵盖 2003—2022 年江西省 11 个地级市, 包括社会经济、环境、土地利用与碳排放 4 类时空序列: 社会经济数据来源于《江西省统计年鉴》《中国城市统计年鉴》及各市年度《国民经济和社会发展统计公报》及《统计年鉴》; 环境数据来源于《江西省环境统计年鉴》; 土地利用来源于武汉大学的中国年度土地覆盖数据集(CLCD); 碳排放数据来源于马克数据网(<https://www.macrodats.cn/>). 个别缺失值以线性插值补齐, 全部指标数据按正负向属性统一进行 Min-Max 归一化, 确保量纲一旦跨期可比.

2 结果与讨论

2.1 时序演化特征

本文就研究区域 GWL 的时序演化特征进行了“趋势-突变-阶段”3 方面分析. 趋势方面, 2003—2022 年江西省 11 地市 GWL 在 0.34~0.77 区间内总体呈显著波动上升态势(图 3-a). M-K 趋势检验显示所有城市 Z 均远高于 1.96 ($P < 0.05$), 拒绝无趋势原假设, 进一步证实上升信号在 95% 置信水平下依然明显成立. 其中, 抚州 ($Z=6.07$) 与新余 ($Z=6.04$) 的上升趋势最为强劲.

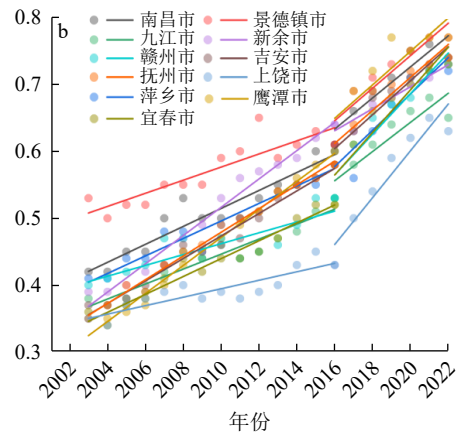


图3 绿色流域水平指数时序变化(a)与阶段回归(b)分析

突变方面, M-K 突变检验显示 UFK 与 UBK 曲线在 2018—2020 年间虽出现交点, 但交点 y 值为 3.73~5.66, 高于 95% 置信上限 (± 1.96), 且 UFK 快速回到临界带内. 因此, 研究时段内江西省 11 地市 GWL 未发生统计学意义上的突变. 这表明, GWL 的提升更可能是一个多因素驱动的渐进累积过程. 一方面, 这与中国环境治理政策的连续性、系统性及效应释放的滞后性相契合; 另一方面, 也反映出产业结构转型、技术扩散应用以及社会观念转变等深层因素通常所具有的缓慢演变特征.

阶段方面, 分段线性回归显示 2016 年是全省 11 地市 GWL 由“缓慢增长”进入“快速增长”的分界点 (图 3-b). 缓慢期年均增速介于 0.006~0.021, 中位 0.013; 快速期斜率升至 0.016~0.035, 中位 0.025, 增速近乎翻倍 ($P < 0.01$). 这恰与《国家生态文明试验区(江西)实施方案》批复、生态考核权重倍增及节能环保投资陡升同步, 表明政策效应将绿色流域构建推入加速通道. 无独有偶, 这一关键节点与张等关于黄河流域乡

村发展水平的研究结论不谋而合^[26]. 这种跨流域与主题的时间共鸣, 增强了阶段划分的可靠性.

2.2 空间格局特征

本文就研究区域 GWL 的空间格局特征进行了“分布-聚集-差异”3 方面分析. 分布方面, 整体上(大部分年份如 2003—2013、2017—2019 年)呈南高北低的梯度格局 (图 4). 然而, 这一格局在以下 2 个时期发生了显著变化: 格局反转期(2014—2016 年), 出现了短暂的北高南低格局; 均衡收敛期(2020—2022 年), 则呈现出全域水平趋同的均衡化发展格局. 可以发现 GWL 空间分布与江西省“山地-湖平原”地貌反向耦合, 这说明生态脆弱区(如湖平原)在有效的治理与优化的产业结构下(以南昌市、景德镇市为代表, 其第三产业占比高、生态负债低)能够实现对环境压力的有效应对, 成为高值区; 而生态本底相对优越的山地区域(如赣州市、上饶市)曾依托资源禀赋发展矿产、重化工等产业, 高环境负荷导致沉重的转型成本, 生态本底优势无法兑现, 成为低值区.

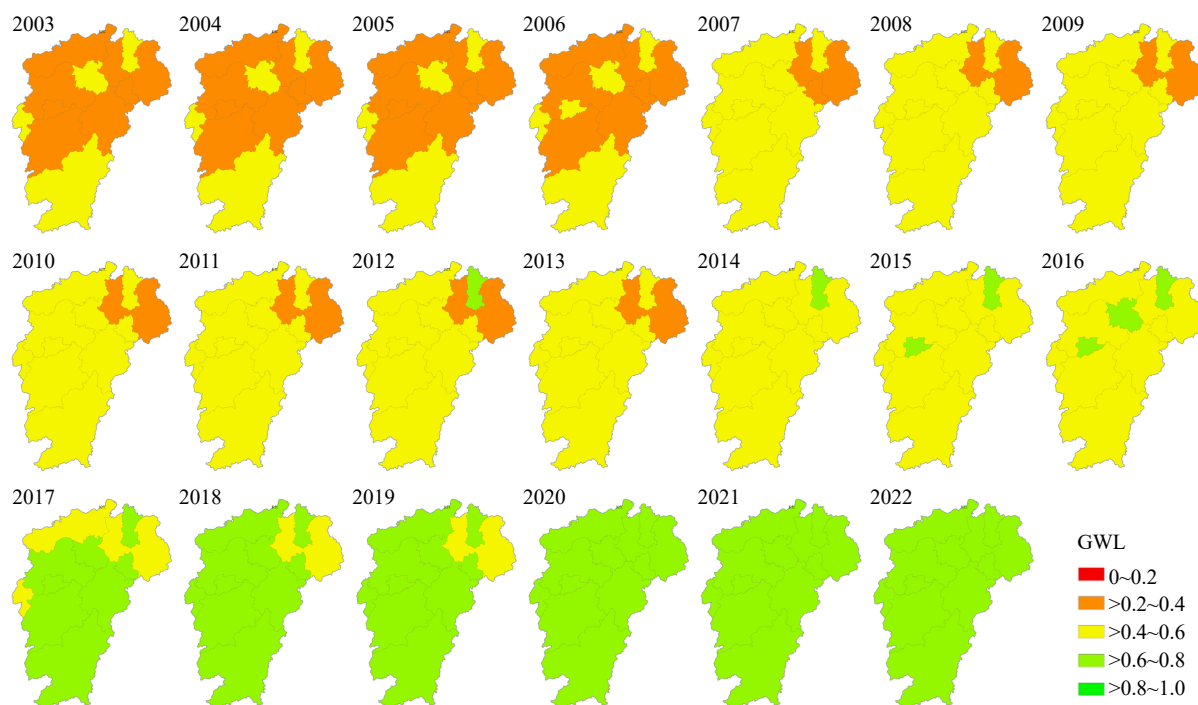


图 4 绿色流域水平指数空间分布

聚集方面, 全局 Moran's I 在 2003—2022 年均呈负值, 但 $P > 0.05$, 表明江西省 GWL 总体无明显聚集情况, 即未形成系统性南北或东西板块式聚集. 局部 Moran's I 和 LISA 聚类揭示出 4 类聚集格局 (图 5): 高-高(HH)仅抚州在 2017 年后出现; 低-低(LL)仅吉安 2005 年闪现; 高-低(HL)集中于南昌、景德镇、萍乡、新余、鹰潭; 低-高(LH)多见于九江、宜春、上饶、

鹰潭. 整体来看, 江西 GWL 空间关联以异质性极化为主, 尚未演化为稳定的面状集群.

差异方面, 2003—2022 年 11 市 GWL 的总体 Dagum 基尼系数在 0.013~0.036 区间呈现“N”型轨迹 (图 6-a), 终点低于起点, 表明区域差异在政策冲击下呈“收敛-扩大-再收敛”的趋势且总体趋向均衡. 而单一城市基尼均值长期位于 0.26~0.27 平台, 但高值极核明显转移

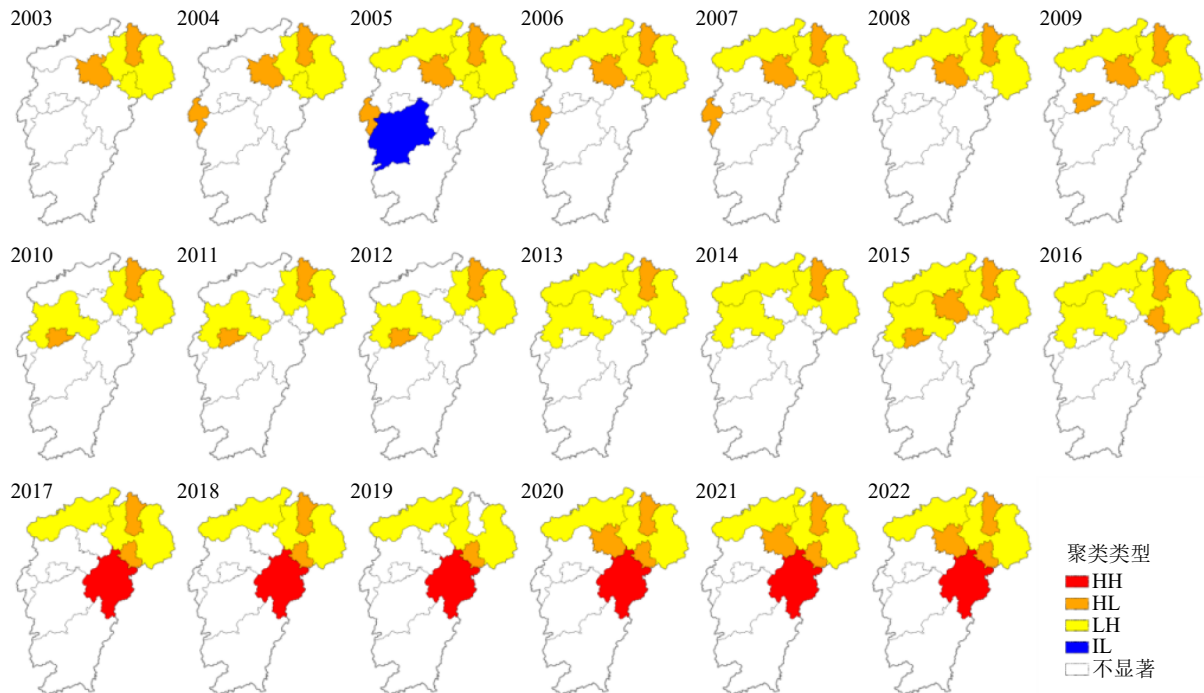


图5 绿色流域水平指数 LISA 聚类

(图6-b). 2003—2012年九江因重化工业密集、生态投入滞后,持续高于均值0.015; 2009—2018年鹰潭因铜

冶炼高排放成为新的高值极核^[27],这一现象说明空间差异并非固化,而是随产业转型与治理投入动态转移。

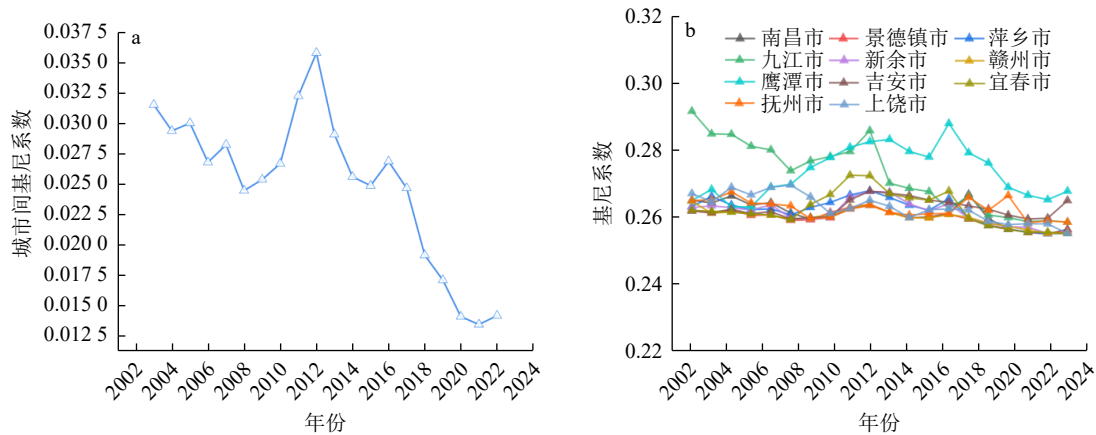


图6 绿色流域水平指数城市间基尼系数(a)和单一城市基尼系数均值(b)分析

2.3 时空耦合特征

本文就研究区域GWL的时空耦合特征进行了“迁移-格局-均衡”3个方面分析. 标准差椭圆(SDE)揭示2003—2022年GWL重心总体沿“东北-西南”轴向西南迁移(图7-a). 具体地,2003—2008年迁移3.19 km, 2008—2013年迁移0.77 km, 2013—2018年重心折向东南迁移2.20 km, 最后2018—2022年再向西南微调0.91 km, 显示GWL高值区已稳定在赣中南山地丘陵带. 椭圆几何特征保持“东北-西南”长轴, 扁率近乎恒定, 但面积呈“V”型, 先聚后散(表3). 重心南移与“先聚后散”同步表明, GWL高值区在赣中南固化的同时, 空间极化-扩散效应并存, 由“核状集聚”向“面

状均衡”过渡。

格局方面, 图7-b以点代线方式刻画了2003—2022年GWL的阶梯式提升. 2003年仅南昌、景德镇、萍乡、赣州4市处于0.4~0.6, 其余7市在0.2~0.4; 逐渐至2007年, 除上饶外GWL整体升至0.4~0.6, 形成“1+10”格局并持续到2013年. 2014年景德镇GWL突破0.6, 逐渐扩散. 2017年多集中于0.6~0.8高值区间, 仅萍乡、九江、上饶3市GWL滞留0.4~0.6; 2020年全域GWL迈入高值区间并持续至2022年, 实现由“单点突破-集群扩散-全域收敛”的3个阶段跃升, 标志着赣江绿色流域建设完成由局部中值向全局高值的质变。

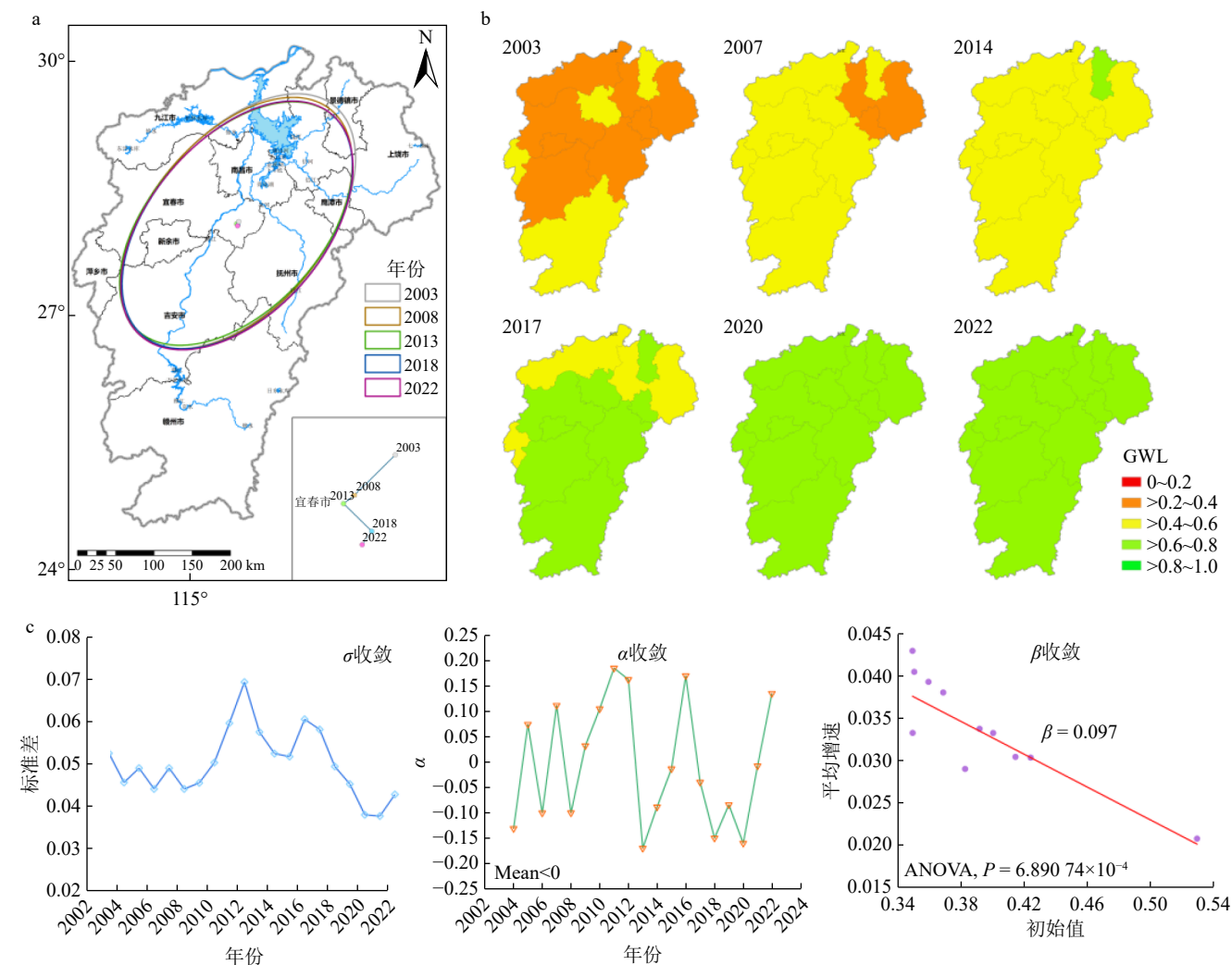


图 7 绿色流域水平指数标准差椭圆(a)、时空格局演变(b)和 σ 、 α 、 β 收敛(c)分析

表 3 标准差椭圆参数

年份	周长/100 km	面积/ 10^4 km ²	经度/(°)	纬度/(°)	X轴/100 km	Y轴/100 km
2003	9.47	6.37	115.796 586	28.046 184	1.88	1.08
2008	9.36	6.27	115.773 936	28.023 783	1.85	1.08
2013	9.23	6.08	115.767 818	28.019 094	1.83	1.06
2018	9.27	6.18	115.783 466	28.003 752	1.82	1.08
2022	9.32	6.23	115.778 171	27.996 307	1.84	1.08

均衡方面,三重收敛显示 11 市 GWL 在 2003—2022 年已系统性趋向时空均衡(图 7-c). 其中, σ_t 先扬后抑, 总体下降 43%, 证实绝对差距持续收敛; α 值在 ± 0.015 区间波动, 均值 < 0 , 表明相对差异缩小. $\beta = -0.097 (P < 0.05)$, 显著为负, 满足收敛判据. 三重收敛一致表明, GWL 的差异已越过峰值收敛, 赣江绿色流域构建正由“梯度分化”迈向“时空均衡”. 这与新古典经济增长理论中的“收敛”假说在内涵上一致^[28], 但将其应用于“绿色流域水平”这一综合环境-发展指标, 表明在有效的区域协调政策下, 绿色发展成果的

共享与扩散是可以实现的.

2.4 驱动机制

本研究中考虑了“人-水-能-碳-绿-城”6 要素对 GWL 的驱动影响, 具体选择人口密度、水生产力、能源生产力、碳生产力、森林覆盖率、城镇化率 6 个指标表征 6 要素. 首先进行了方差膨胀因子(F_{vi})对 6 个因子进行了多重共线性检验, 检验结果显示 F_{vi} 最大为 4.8, 均 < 5 , 故 6 个因子适用于 GTWR 建模. 继而, GTWR 模型 R^2 与调整后 R^2 均 > 0.98 , 可很好地解释 GWL 的局域驱动演化. 6 大要素的边际效应呈现“相

继越顶、衰减分化”的共性轨迹(图8)。

人口密度系数由平均正值(0.011)逐渐减小为平均负值(-0.013),表明“人口增量”已越过最优规模,拥堵效应与排放密度上升主导,对绿色流域作用由促

进转为抑制,抑制自吉安、赣州等南部城市向北扩散,全流域逐渐均衡。值得说明的是,南昌市75%年份仍维持正系数,这主要得益于省会城市的缓冲能力,可以及时将“人口增量”转化为“GWL发展生产力”。

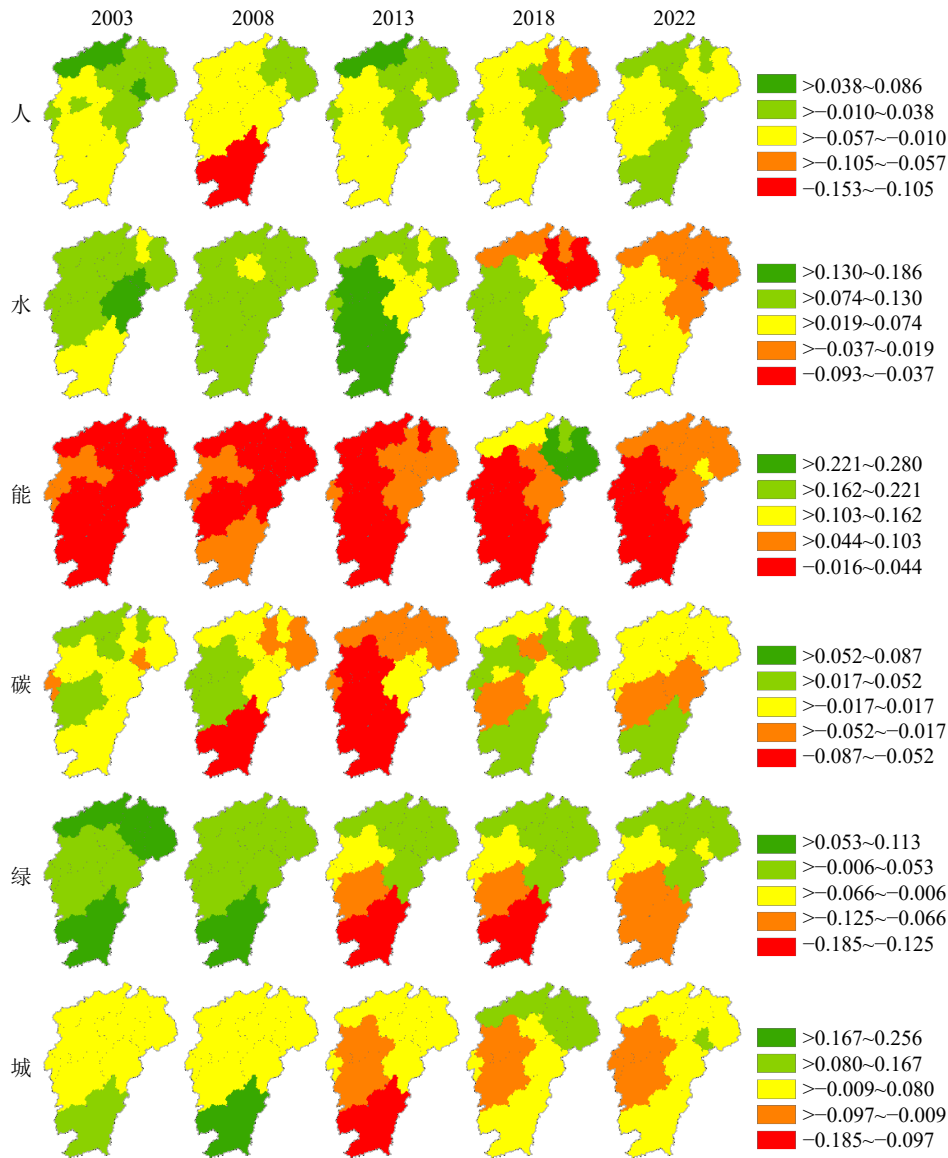


图8 绿色流域水平的“人-水-能-碳-绿-城”驱动系数的时空分布

水生产力系数年度均值为正,但自2015年0.093快速衰减到2022年0.016,且中低值向上饶、鹰潭等东北部城市聚集,表明水生产力对GWL总体仍起正向作用,但衰减迅速,东北部城市更为显著。这显示用水效率促进已近峰值;未来增量需转向水生态服务而非单纯节水。

能源生产力系数年度均值由0.023持续升至0.057,同时中高值区自赣西(萍乡、新余)外溢至全域,表明能源生产力对GWL发展具有促进作用且强作用区域自赣西向全流域扩散。这主要是因为赣西通过

高载能行业节能、清洁电力替代、用能权市场率先把能源生产力推到高平台,随后技术-成本-制度的三重外溢让高能源生产力到高绿色流域的能源-绿色耦合模式在全流域复制。

碳生产力系数由平均正值(0.004)衰减到平均负值(-0.009),经历了“西正东负-南北分化-普遍衰减”3阶段,目前仅赣州、宜春维持弱正效应,这表明依靠碳生产力提升来促进绿色流域发展已触顶即边际成本陡升,未来流域绿色增长需转向零碳能源与系统脱碳的新路径。

森林覆盖率系数呈现“普遍正向-快速反转-边际趋零”3阶段轨迹. 赣西、赣中 2009 年起率先转负(2012 年赣州系数-0.160), 表明该时期退耕还林与高载能产能同步扩张, 森林增量反而通过加剧地表径流以同步污染通量使 GWL 下降; 下游南昌、九江虽保持正效应, 但已降至 0.035, 表明“造林增绿”接近饱和, 未来重点应转向“林分质量-水源涵养-生物多样性”协同提升.

城镇化率系数年度均值呈“倒 U 型”, 峰值出现在 2010 年, 空间上“南北高、中部低”. 中部城市率先转负, 2015 年后全省系数向零收敛, 说明传统“速度型”城镇化对绿色流域促进作用已耗尽, 未来需依靠“产业结构升级+基础设施运行效率+生态流量保障”优化绿色流域发展.

综上, 6 个指标均越过各自边际高点, 未来绿色流域需从单一要素投入转向全要素耦合协同优化, 由“规模驱动”转向“质量驱动”突破衰减瓶颈. 同时, 上述 6 大驱动因子边际效应“相继越顶、衰减分化”的共性轨迹, 揭示了一个超越单一要素的重要规律: 在流域绿色发展进程中, 各类要素的驱动作用遵循一个内在的“生命周期”. 在早期, 要素稀缺, 其投入的边际收益显著(效益递增期); 随着该要素规模持续扩大, 其稀缺性下降, 最终会抵达边际收益的峰值; 此后若发展模式未能及时升级, 该要素的继续投入将面临边际成本激增、甚至产生负外部性(如人口拥堵、造林加剧面源污染), 从而进入“衰减期”. 不同要素“越顶”时间点的差异, 正体现了它们从“稀缺资源”转变为“系统性约束”的次序不同.

这一发现对经典的环境库兹涅茨曲线(EKC)理论提供了重要补充^[29]. 它表明, 在追求绿色发展的复杂系统中, 不仅污染排放存在拐点, 推动绿色转型的各类正向要素本身, 其效能也存在拐点^[30]. 因此, 实现流域可持续发展的关键, 不在于无约束地强化单一路径, 而在于精准识别不同发展阶段的主导约束, 并在旧要素动力衰减前, 主动培育新要素、构建新协同, 实现发展动力的无缝接续与系统转换. 这也从机制上印证了, 为何未来绿色流域建设必须从“规模驱动”转向“质量驱动”, 从“要素投入”转向“系统协同”.

3 结论与建议

3.1 结论

时序方面, 2003—2022 年研究区域绿色流域水平不断提高, 自 2016 年由缓慢增长阶段进入快速增长阶段, 增速倍增. 空间方面, 同时间绿色流域水平南高北低, 南昌、景德镇领先发展, 上饶相对滞后; 局部

吉安 2005 年短暂低值聚集, 抚州后期出现高值聚集, 其余城市多表现为“高值孤岛”或“低值洼地”; 城市间总体差异呈“N”型缩小, 九江与鹰潭先后成为差异高点, 空间不均衡程度逐渐收敛. 时空耦合方面, 绿色流域水平重心向西南迁移, 先聚集后离散, 东北-西南向离散程度较高; 整体由 2003 年 4 市中值、7 市低值提高到 2020 年全域达高值区间; σ 收敛呈倒 V 型回落, α 波动减小, β 显著为负, 三重收敛共同验证区域差异缩小, 绿色流域水平逐步向整体均衡演进. 驱动因素方面, “人-水-能-碳-绿-城”6 要素的驱动效应相继越过高点衰减: 人口、碳生产力先后由正转负, 水、森林的边际因子迅速缩减, 能源正向效应仍在扩散但增速放缓, 城镇化效应趋零. GTWR 模型揭示各要素增量空间紧张, 未来需由“单要素增量”转向“六要素耦合协同优化”, 以突破边际衰减瓶颈.

3.2 建议

1) 精准施策, 差异构建. 针对南昌等先行区和抚州等强劲增长区, 总结发展模式, 通过与周边城市共建产业园等方式, 将增长动能向外扩散; 对于上饶等滞后区, 倾斜资源, 产业转型, 避免滞后固化; 而鹰潭等波动区则是空间均衡的关键因素, 应建立动态监测体系, 及时预警其发展割裂.

2) 空间联动, 共同发展. 针对南昌等存在高值孤岛效应城市, 作为城市群核心, 通过知识、技术和产业合作, 带动周边发展, 稳定空间均衡成果. 优先沿东北-西南主轴布局跨城生态廊道、绿色基础设施及交通干线, 促进要素在优势方向上的高效流动.

3) 探索“人-水-能-碳-绿-城”6 要素间的耦合协同发展机制. 发展可再生能源, 以绿电推动工业等领域深度脱碳, 探索能-碳协同; 高品质发展森林湿地复合系统, 提升水源涵养和碳汇能力, 探索水-碳-绿协同等.

3.3 研究局限与展望

尽管本研究构建了“时序-空间-时空”3 维分析框架, 对赣江流域绿色流域水平进行了系统性评估, 但仍存在一些局限性, 未来研究可据此进一步深化:

1) 指标体系的局限. 本研究指标选取在“科学性”与“数据可得性”之间进行了权衡. 一方面, 受限于数据的获取, 表征“生态系统健康”的指标(如生物多样性、河流生态径流等)暂未纳入, 而是以“自然绿地覆盖率”“水域面积保留率”等替代指标进行替代; 另一方面, 在污染表征上, 虽已根据《江西省生态环境统计年报》, 聚焦于占比最高的生活污水与一般工业固废, 但仍未完全覆盖农业面源及危险废物等全面污染源. 未来随着高频生态监测与更精细化的环境统计数据的发布, 构建更全面、更直接的生态健康与全口径污

染指标体系是重要的改进方向。

2) 驱动机制的局限。本研究采用 GTWR 模型揭示了“人-水-能-碳-绿-城”要素的驱动模式, 但驱动因子的选取仍可进一步丰富。例如, 未来可考虑纳入政策法规、环保投资、技术创新等社会-经济-治理维度的软指标, 以更全面地解析绿色流域演化的深层动力。

3) 研究尺度的局限。本研究以地市级为基本单元, 虽能把握宏观格局, 但可能掩盖了县域甚至更小流域单元的内部异质性。后续研究可尝试在更精细的尺度上进行, 以支持差异化的精准管控。

4 参考文献

- [1] 严政. 联合国可持续发展目标近半进展缓慢 [J]. *生态经济*, 2025, 41(9): 1
- [2] 姜付仁, 王梓紫, 袁春. 欧盟水框架指令实施 20 年成效分析及对我国绿色流域建设的启示 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 61(4): 488
- [3] 许继军, 杨明智. 绿色流域构建必要性与实现路径探讨 [J]. *中国水利*, 2024(23): 36
- [4] 清华大学环境学院. 专访曲久辉院士: 视距之外的“绿色”流域是怎样的 [Z/OL]. <https://www.env.tsinghua.edu.cn/info/1129/8298.htm>. 2023
- [5] 章轲. 二十大报告: 推进美丽中国建设协同推进降碳、减污、扩绿、增长 [N]. *第一财经*, 2022-10-17
- [6] 段诗昊, 贾志昇, 张明慧, 等. 中国绿色流域政策制度管理体系研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 61(5): 680
- [7] 杨玖, 代佼, 龚兴涛, 等. 基于多种方法的长江上游小流域水质综合评价 [J]. *中国环境监测*, 2023, 39(增刊1): 19
- [8] 欧阳莉莉, 何鑫, 孟旭, 等. 沱江成都段河流生态健康评估研究 [J]. *环境科学与技术*, 2024, 47(5): 200
- [9] 刘国庆. 基于水环境-水生态-社会服务功能的南四湖健康评价和协调发展研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022
- [10] Lallemant D, Hamel P, Balbi M, et al. Nature-based solutions for flood risk reduction: a probabilistic modeling framework[J]. *One Earth*, 2021, 4(9): 1310
- [11] Fu X, Hopton M E, Wang X H. Assessment of green infrastructure performance through an urban resilience lens[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 289: 125146
- [12] Lourdes K T, Hamel P, Gibbins C N, et al. Planning for green infrastructure using multiple urban ecosystem service models and multicriteria analysis[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 226: 104500
- [13] Wang X Y, Zeng Y, Wang P, et al. Scale effects of spatial patterns of ecosystem services in the Tarim River Basin in Central Asia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, 197(3): 241
- [14] 马放, 胡仁强, 李治军. 汉江流域水资源“韧性-脆弱性-可持续性”评价及其影响分析 [J]. *水电能源科学*, 2025, 43(5): 57
- [15] 申庆元, 朱九龙, 马锐锋, 等. 黄河流域水环境污染空间格局与跨域协同治理影响因素 [J]. *人民黄河*, 2025, 47(1): 97
- [16] 李一阳, 杨荣雪, 刘璇, 等. 牟汶河流域“水资源-水环境-经济社会”耦合系统综合评价 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 61(4): 475
- [17] . 江西省人民政府办公厅关于印发《赣江中游(吉安)生态经济带高质量发展总体规划》的通知 [J]. *江西省人民政府公报*, 2024(24): 6
- [18] 黄承梁, 李志萌, 刘勇, 等. 打造美丽中国“江西样板”: 习近平生态文明思想在江西的理论与实践 [J]. *江西师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2025, 58(1): 34
- [19] 方婷婷, 王磊, 段学军, 等. 人水关系视角下长江经济带绿色流域发展水平时空演变 [J]. *资源科学*, 2025, 47(3): 543
- [20] 徐述邦, 刘建峰, 陈燕飞, 等. 长江经济带碳排放时空演变特征及驱动因素研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 61(4): 466
- [21] Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. *Empirical Economics*, 1997, 22(4): 515
- [22] 王琪, 魏庆彬, 孟庆庆, 等. 黑龙江省县域碳排放时空变化及其影响因素分析 [J/OL]. *环境科学*, 2025 (2025-11-28) [2025-12-05]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=ZO6hV6rGk-bysDRBtPr0c09RNIWw02sPv8CCnXPMOz-KE5KdCBVPheUcqRmlRljywszd0W6NCtOlq1FFaAtjPrsD6-axW-6E7T6vatn0WWXmaHuVWHXFOE7cI3jVvQ0St-Kncim04IYTpwuU9TzDEfuakUtmuK_PhjKdhHRJuUAilGPrGFByYKqg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS
- [23] 王红瑞, 杜新龙, 王煜, 等. 水资源空间均衡调控理论框架与平衡机制 [J]. *水资源保护*, 2026, 42(1): 1
- [24] 梁邦海, 严汉平, 李冀. 西部三大经济区城市经济增长收敛性研究 [J]. *城市问题*, 2013(1): 32
- [25] 朱梅涛, 王然, 邢莉圆, 等. InVEST-GTWR 模型下京津冀地区土壤保持策略研究 [J]. *环境科学与技术*, 2025, 48(7): 151
- [26] 张新成, 王琳艳, 吴昕阳, 等. 黄河流域和美乡村与乡村旅游协同水平测度及路径识别 [J]. *中国沙漠*, 2025, 45(6): 176
- [27] 许成健. 鹰潭市铜产业发展战略研究 [D]. 南昌: 江西财经大学, 2018
- [28] 赵东奎. 内生增长的进化模型 [D]. 长春: 吉林大学, 2006
- [29] Guo X, Shahbaz M. The existence of environmental Kuznets curve: Critical look and future implications for environmental management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119648
- [30] 赵菲菲, 卢丽文. 环境治理视角下环境库兹涅茨曲线的实证检验 [J]. *统计与决策*, 2022, 38(20): 174

Toward spatiotemporal equilibrium: dynamic evolution and multi-factor driving mechanisms of the green watershed level in the Ganjiang River basin

Jia Zhisheng^{1, 2)}, Wang Hongyang²⁾, Zhang Minghui²⁾, Duan Shihao^{2, 3)},
Ma Li⁴⁾, Hong Pei^{2, 3)}, Xu Rui²⁾, Pu Shengyan¹⁾

(1) State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China;

2) Chinese Research Academy of Environmental Sciences, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Beijing, China;

3) School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Collaborative Innovation Center of Recovery and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Wanjiang Basin Co-founded by Anhui Province and Ministry of Education, Wuhu, Anhui, China; 4) Tianjin Eco-Environmental

Monitoring Center, Tianjin, China)

Abstract With pressures from global warming and ecological degradation, it has become a core issue to establish a system for “intelligent, streamlined and efficient” green watershed assessment in sustainable development. In this paper a three-dimensional, nine-level framework integrating “temporal-spatial-spatiotemporal” dimensions is proposed for the Ganjiang River basin. The framework, (coupling AHP-EWM, M-K trend and abrupt change tests, piecewise-linear-fitting, Moran’s I , LISA clustering, Dagum Gini, standard deviation ellipses and triple convergence tests σ - α - β), comprehensively measures the green watershed level (GWL) across 11 cities in Jiangxi province from 2003-2022. GTWR analysis reveals driving patterns of six factors: human-water-energy-carbon-green-urban. Temporally, GWL exhibits sustained growth without abrupt changes, transitioning from slow to rapid growth from 2016. Spatially, GWL shows higher values in the south but lower in the north, with predominant “high-low” and “low-high” local clusters. Regional disparities decline in an “N”-shaped pattern, reflecting spatially unbalanced convergence. In spatiotemporal coupling, GWL center of gravity shifted southwestward, with distribution patterns evolving from clustering to dispersion. GWL of the 11 cities progressed from a median value in 4 cities and a low value in 7 cities in 2003 to a high-value range of 0.6–0.8 across all regions by 2020. Triple convergence of σ , α , and β confirms that GWL of the 11 cities is moving toward spatiotemporal equilibrium. Regarding driving mechanisms, marginal effects of six factors successively peaked and declined: population and carbon productivity shifted from positive to negative, water and forest marginal dividends rapidly diminished, positive effect of energy expanded at a slower pace, and urbanization effect passed its inflection point to approach zero. These findings provide historical references and precise policy guidance for high-quality developments in the Ganjiang River basin, offering methodological insights for other provinces as well.

Keywords green watershed; comprehensive assessment; temporal evolution; spatial pattern; spatio-temporal coupling; driving mechanism

【责任编辑:武佳】