

# 基于 Super-SBM 与 GTWR 的长江流域农业水资源效率 时空格局、空间关联网络及驱动因素

朱前涛<sup>1</sup>, 刘人宁<sup>1</sup>, 杨荣<sup>2</sup>

(1. 兰州财经大学经济学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院干旱区生态安全与  
可持续发展重点实验室临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000)

**摘要:** [目的] 提升农业水资源效率是保障长江流域粮食安全、推动农业绿色转型与水土保持高质量发展的关键。从时空格局、空间关联网络与时空异质性视角, 揭示农业水资源效率分异特征及驱动因素, 为流域农业节水、水土流失防控与水资源协同配置提供科学依据。[方法] 以长江流域 6 个粮食主产省的 64 个地级市 2014—2023 年面板数据为样本, 采用超效率 Super-SBM 模型对农业水资源效率进行测算, 运用修正引力模型与社会网络分析刻画有向非对称空间关联结构, 通过时空地理加权回归识别影响因素的时空非平稳性。[结果] 1) 农业水资源效率平均值由 0.529 升至 0.801, 呈“上游 > 下游 > 中游”格局, 高效率集聚于四川盆地与下游沿江平原, 低效率集中于中游山地丘陵区, 与水土流失高风险区高度重叠。2) 空间关联网络密度由 0.105 降至 0.097, 网络等级度下降、网络效率上升, 结构趋于扁平化与多中心化, 徐州、合肥为核心枢纽, 怀化、娄底、池州等长期处于边缘。3) 各影响因素存在明显的时空异质性, 回归结果均通过 5% 显著性水平检验。其中年降雨量、农田有效灌溉率回归系数整体呈负向效应, 人均 GDP、农作物种植结构、人口素质和财政支农回归系数呈正向驱动。[结论] 长江流域农业水资源效率持续提升但区域分化突出, 空间网络呈“核心-边缘”结构, 中游山区为水资源效率与水土保持双重短板区。未来应强化中游水土保持与节水改造协同, 提升边缘城市网络嵌入能力, 推动流域水资源高效协同利用。

**关键词:** 长江流域; 农业水资源效率; 空间关联网络; 时空异质性; 驱动因素

中图分类号: F323.213

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0375-15

## Spatiotemporal Patterns, Spatial Association Network, and Driving Factors of Agricultural Water Resource Efficiency in the Yangtze River Basin Based on Super-SBM and GTWR

Zhu Qiantao<sup>1</sup>, Liu Renning<sup>1</sup>, Yang Rong<sup>2</sup>

(1. College of Economics, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730000, China;

2. Linze Inland River Basin Research Station, Key Laboratory of Ecological Security and Sustainable  
Development in Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,  
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** [Objective] Improving agricultural water resource efficiency is critical to ensuring food security, promoting green agricultural transformation, and achieving high-quality soil and water conservation in the Yangtze River Basin. This study reveals the differentiation characteristics and driving factors of agricultural water resource efficiency from the perspectives of spatiotemporal patterns, spatial association networks, and spatiotemporal heterogeneity, providing scientific support for agricultural water saving, soil erosion control, and coordinated water allocation. [Methods] Using panel data of 64 prefecture-level cities across six provinces in the Yangtze

收稿日期: 2026-04-13

修回日期: 2026-05-06

录用日期: 2026-05-13

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-08-18

资助项目: 甘肃省高校青年博士“入企入园”项目(2026QB-054); 国家自然科学基金青年科学基金项目(42501140)

第一作者: 朱前涛(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事自然资源管理研究。E-mail: zhuqt@lzu.edu.cn

通信作者: 朱前涛(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事自然资源管理研究。E-mail: zhuqt@lzu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

River basin from 2014 to 2023, the Super-SBM model was employed to measure agricultural water resource efficiency. A modified gravity model and social network analysis were used to characterize the directed asymmetric spatial association structure, and geographically and temporally weighted regression (GTWR) was applied to identify the spatiotemporal non-stationarity of influencing factors. [Results] 1) The average agricultural water resource efficiency increased from 0.529 in 2014 to 0.801 in 2023, exhibiting a pattern of "upstream>downstream>midstream". High-efficiency areas were clustered in the Sichuan basin and the lower Yangtze River plain, while low-efficiency areas were concentrated in the midstream hilly and mountainous regions, which largely overlapped with high-risk zones of soil erosion. 2) The density of the spatial association network decreased from 0.105 to 0.097, while network hierarchy decreased and network efficiency increased, indicating a flatter, more polycentric structure. Xuzhou and Hefei served as core hubs, whereas Huaihua, Loudi, and Chizhou remained persistent peripheries. 3) All influencing factors exhibited obvious spatiotemporal heterogeneity, and all regression results passed the 5% significance level test. Specifically, annual precipitation and the effective irrigation ratio showed negative effects, while per capita GDP, crop structure, population quality, and fiscal support for agriculture exerted positive effects. [Conclusion] Agricultural water resource efficiency in the Yangtze River basin has improved steadily, but regional disparities remain prominent, with a core-periphery structure in the spatial network. The midstream mountainous region is a dual weak area for both water use efficiency and soil and water conservation. Future efforts should strengthen the synergy between soil conservation and water-saving retrofitting in the midstream, enhance the network embedding capacity of peripheral cities, and promote efficient and coordinated utilization of water resources across the basin.

**Keywords:** Yangtze River basin; agricultural water resource efficiency; spatial association network; spatiotemporal heterogeneity; driving factors

Received: 2026-04-13

Revised: 2026-05-06

Accepted: 2026-05-13

Online(www.cnki.net): 2026-08-18

水是生命之源、生产之要、生态之基。提高农业水资源利用效率直接关乎国家粮食安全、生态安全与区域协调发展。长江流域是我国核心产粮区,近年水资源总量约占全国 33.95%,农业经济产值占全国四成以上,流域内湖北、湖南、江西、安徽、江苏、四川 6 省粮食主产区农业用水量占全流域 50.82%。在“以水定地、以水定产”“四水四定”原则下,推进农业水资源集约利用与绿色高效配置,已成为保障粮食安全、推动农业绿色转型、提升水土保持质量的重要任务<sup>[1]</sup>。习近平总书记强调“长江经济带发展需立足生态优先、绿色发展”,受季风气候与地形地貌影响,长江流域水资源时空分布不均、季节性缺水突出,加之农业用水粗放、面源污染、山地丘陵区水土流失等问题,严重制约农业水资源效率提升与流域生态安全<sup>[2]</sup>。

国内外学者<sup>[3]</sup>对农业水资源效率的研究涵盖区域、省域及流域尺度,测度方法以随机前沿分析、数据包络分析和综合评价指标体系为主,并借助空间自相关、地理加权回归等方法探讨资源禀赋、种植结构、灌溉技术、经济水平、政策调控等因素的影响机制<sup>[4]</sup>。随着空间计量方法的发展,学者逐渐认识到水资源效率在区域间并非孤立存在,而是通过地理邻

近、经济联系、技术扩散等渠道形成复杂的空间交互与溢出效应<sup>[5]</sup>。在研究方法上,现有文献主要分为 2 类:一类是基于探索性空间数据分析和空间杜宾模型的传统空间计量方法,侧重于检验效率的空间依赖性与聚类特征<sup>[6]</sup>;另一类是基于修正引力模型和社会网络分析的方法,侧重于刻画区域空间关联结构与节点特征<sup>[7]</sup>,然而,前者多假设空间关联为对称双向关系,后者则能够刻画有向非对称关系,但多停留于描述性统计,较少将网络位置与驱动因素进行定量耦合。在研究尺度上,既有研究多聚焦于省级单元,地级市层面的研究相对较少<sup>[8]</sup>。在研究视角上,现有研究侧重于经济效益或资源节约,近年来逐步转向兼顾环境效应的“绿色效率”<sup>[9]</sup>,但在识别影响因素的空间异质性时,多采用全局回归或静态面板模型<sup>[10]</sup>。针对长江经济带和黄河流域等重点区域,部分学者<sup>[11]</sup>尝试引入空间计量或网络分析方法,但仍存在不足:一是多采用传统空间自相关方法,较少从有向非对称网络视角系统解析整体结构与节点特征;二是以省级尺度为主,地市级研究相对匮乏,难以刻画山地丘陵与平原区在灌溉设施、水土保持方面的真实差异;三是影响因素分析多采用全局或静

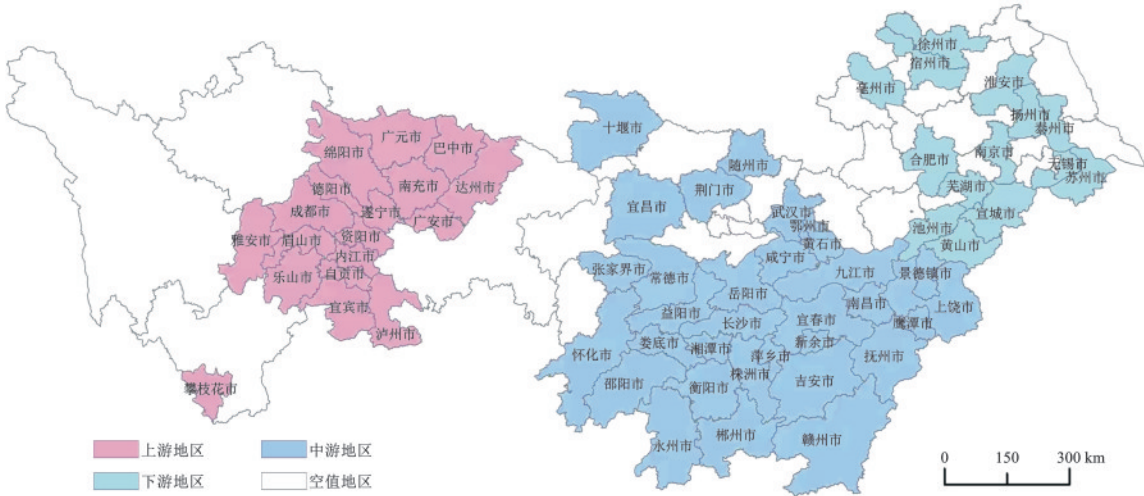
态模型,难以捕捉时空非平稳性,对水土保持、灌区节水、径流调控等流域实践指向性不足。

鉴于此,本文以长江流域 6 省 64 个地级市为对象,基于 2014—2023 年面板数据,构建“效率测度-网络分析-时空驱动-对策优化”框架,开展 3 点创新:一是视角创新,将农业水资源效率从传统空间分析拓展至有向非对称空间关联网,刻画节点地位、溢出路径与“核心-边缘”结构;二是以地级市为单元,结合长时序数据与时空地理加权回归(geographically and temporally weighted regression, GTWR)模型精细识别时空异质性;三是立足流域分异特征,揭示水土资源匹配、灌区建设与降水分布对效率的约束机理,为流域协同节水与提升水土保持效能提供新视角。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江流域是我国重要的水资源与生态安全屏障,以亚热带季风气候为主,年降水量约 1 100 mm,水资源禀赋总体丰富但时空分布不均,季节性与区域性缺水问题突出。为保证行政区划完整性,剔除仅部分区域位于流域内的 8 个省级行政区(贵州、甘肃、陕西、河南、广西、广东、浙江、福建),在此基础上,考虑到青海、西藏、云南、重庆 4 个地区数据获取难度较大,且缺失值较多;同时上海市作为高度城市化的直辖市,与其他地级市存在显著异质性,基于数据可得性与样本可比性原则,最终选取长江流域上游(四川)、中游(湖北、湖南、江西)、下游(安徽、江苏)6 个粮食主产省共 64 个地级市为研究单元(图 1)。



注:基于自然资源部标准地图下载的审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图未修改。下同。

图 1 研究区域  
Fig.1 Study area

1.2 研究方法

1.2.1 投入产出指标体系构建 借鉴既有研究<sup>[12-13]</sup>,结合长江流域农业资源禀赋与生态特征,构建投入产出指标体系(表 1)。

表 1 农业水资源效率投入与产出评价指标体系  
Table 1 Input and output index system for evaluating agricultural water resource efficiency

| 指标类别 | 变量选取   | 指标        | 单位                              |
|------|--------|-----------|---------------------------------|
| 投入指标 | 劳动力投入  | 第一产业就业人数  | 万人                              |
|      | 土地资源投入 | 有效灌溉面积    | 10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> |
|      | 水资源投入  | 农业用水总量    | 亿 m <sup>3</sup>                |
|      | 资本投入   | 农业机械总动力   | 10 <sup>4</sup> kW              |
|      | 化学资源投入 | 农药施用量     | 万 t                             |
| 产出指标 |        | 农用化肥施用折纯量 | 万 t                             |
|      | 期望产出   | 农业总产值     | 亿元                              |
|      |        | 粮食总产量     | 万 t                             |
|      | 非期望产出  | 农业面源污染    | 万 t                             |

投入指标包括第一产业就业人数、农业用水总量、有效灌溉面积、农业机械总动力、农药施用量、农用化肥折纯量,分别表征劳动力、水资源、土地、资本与化学投入。期望产出为农业总产值与粮食总产量,衡量农业生产的经济价值与粮食安全保障功能;非期望产出为农业面源污染,综合反映环境外部性,契合农业绿色发展与水土保持评价要求。

1.2.2 影响因素指标体系构建 借鉴相关研究<sup>[14-15]</sup>,农业水资源效率受自然、经济、生产、社会、政策多维驱动。本文从 5 个维度构建指标体系:1)自然资源禀赋,包括人均水资源量、年降雨量和年平均气温,反映农业生产的用水可得性与灌溉需求;2)经济发展水平,包括人均 GDP、第一产业比例及第一产业固定资产投资增速,体现区域经济实力对节水技术推广和水利设施升级的支撑;3)农业生产条件,包括农作物种

植结构和农田有效灌溉率,刻画作物需水特征与基础设施对效率的直接作用;4)社会发展状况,包括城镇化程度和人口素质水平,反映劳动力结构与受教育水平对节水技术采纳能力及节约意识的影响;5)政府支持力度,包括科技支出、对外开放程度、财政支农水平和环境规制强度,体现政策调控作用(表2)。

表 2 农业水资源效率影响因子指标体系  
Table 2 Indicator system for drivers of agricultural water resource efficiency

| 影响方面   | 具体指标                                       | 指标说明                 | 变量              |
|--------|--------------------------------------------|----------------------|-----------------|
| 自然资源禀赋 | 人均水资源量/(m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup> )  | 水资源总量/地区总人口          | X <sub>1</sub>  |
|        | 年降水量/mm                                    | 衡量各地级市年降水水平          | X <sub>2</sub>  |
|        | 年平均气温/℃                                    | 衡量地区的热量条件,影响作物蒸散发    | X <sub>3</sub>  |
| 经济发展水平 | 人均GDP/(10 <sup>4</sup> 元·人 <sup>-1</sup> ) | 地区生产总值/总人口           | X <sub>4</sub>  |
|        | 第一产业比例/%                                   | 第一产业产值/地区生产总值        | X <sub>5</sub>  |
|        | 第一产业固定资产投资增速/%                             | 第一产业固定资产投资额/第一产业生产总值 | X <sub>6</sub>  |
| 农业生产条件 | 农作物种植结构/%                                  | 粮食播种面积/农作物播种面积       | X <sub>7</sub>  |
|        | 农田有效灌溉率/%                                  | 有效灌溉面积/耕地面积          | X <sub>8</sub>  |
| 社会发展状况 | 城镇化程度/%                                    | 城镇人口数/年末常住人口数        | X <sub>9</sub>  |
|        | 人口素质水平/a                                   | 农村居民人均受教育年限          | X <sub>10</sub> |
| 政府支持力度 | 科技支出水平/%                                   | 科学技术支出/一般公共预算支出      | X <sub>11</sub> |
|        | 对外开放程度/%                                   | 进出口总额/地区生产总值         | X <sub>12</sub> |
|        | 财政支农水平/万元                                  | 农林水支出金额              | X <sub>13</sub> |
|        | 环境规制强度                                     | 政府工作报告中与环境规制相关的词频    | X <sub>14</sub> |

1.2.3 Super-SBM 模型 采用 Tone 提出的超效率 SBM 模型 (super-efficiency slacks-based measure, Super-SBM) 测度农业水资源效率。该模型能够同时考虑期望产出与非期望产出,更契合农业绿色效率评价的复杂性和系统性要求<sup>[16]</sup>。以表 1 中的投入指标作为模型的投入变量,期望产出和非期望产出作为产出变量,测算得到各城市各年度的农业水资源效率值。在测算得到各年度农业水资源效率值后,采用 ArcGIS 自然断点法将其划分为低效率、中等效率和高效率 3 个等级,以分析空间格局演进特征。

$$\rho^* = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}_i}{x_{ik}}}{\frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{r=1}^{s_1} \frac{y_r^g}{y_{rk}^g} + \sum_{q=1}^{s_2} \frac{y_q^b}{y_{qk}^b} \right)} \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_j \lambda_j \\ y^{-g} \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_j^g \lambda_j \\ y^{-b} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_j^b \lambda_j \\ \bar{x} \geq x_0, y^{-g} \leq y_0^g, y^{-b} \geq y_0^b, y^{-g} \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:ρ<sup>\*</sup>为测算所得效率值;m为投入指标数量;k为评价单元;i、r、q对应投入、期望产出、非期望产出;s<sub>1</sub>、s<sub>2</sub>为期望与非期望产出个数;g、b为松弛变量类别; $\bar{x}_i$ 、 $y_r^g$ 、 $y_q^b$ 为松弛向量; $x_{ik}$ 、 $y_{rk}^g$ 、 $y_{qk}^b$ 为投入与产出值;λ为组合系数。

1.2.4 核密度估计 本文借助 Matlab 软件绘制核密度分布图,以刻画农业水资源效率的时序分布演化特征。采用高斯核密度估计方法<sup>[17]</sup>。

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (3)$$

式中:n为样本观测数量;h为带宽;k(·)为核函数且满足h>0;x-x<sub>i</sub>为估计点x与样本观测点x<sub>i</sub>之间的距离。

1.2.5 收敛性分析 为揭示农业水资源效率的差异格局及其动态演变规律,引入σ收敛方法<sup>[18]</sup>,以变异系数(CV)为核心测度工具。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{N}} \quad (4)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{Y}} \quad (5)$$

式中:S为标准差;Y<sub>i</sub>为第i个地区的农业水资源效率; $\bar{Y}$ 为所有地区农业水资源效率平均值;N为研究区域的样本数量;CV为变异系数。

1.2.6 修正引力模型 为描述城市间农业水资源效率的空间关联强度,本文引入修正引力模型。该模型以农业水资源效率值为核心变量,结合城市常住人口、地区生产总值和空间距离进行计算。其中,效率值的比值项用于体现非对称性,计算得到的联系强度矩阵作为后续社会网络分析的输入数据。该模型能够反映城市间联系的复杂性与非对称性<sup>[19]</sup>。

$$F_{ij} = \frac{E_i}{E_i + E_j} \times \frac{\sqrt[3]{P_i G_i E_i} \sqrt[3]{P_j G_j E_j}}{(d_{ij})^2} \quad (6)$$

式中:  $F_{ij}$  为城市  $i$  与  $j$  的空间联系强度;  $E_i$  和  $E_j$  为第  $i$  市与第  $j$  市的农业水资源效率;  $d_{ij}$  为空间距离;  $P_i$ 、 $P_j$  为常住人口;  $G_i$ 、 $G_j$  为地区生产总值。

1.2.7 社会网络分析法 基于修正引力模型计算的联系强度矩阵,以年度均值为阈值构建二值化有向网络。为揭示各城市在空间关联网中的功能定位与作用差异,运用社会网络分析(social network analysis, SNA)计算整体网络指标和节点中心性指标,各项指标的计算借助 Ucinet 软件完成<sup>[20]</sup>(表 3)。

表 3 社会网络分析相关指标说明  
Table 3 Description of relevant indicators for social network analysis

| 项目    | 具体指标      | 公式                                            | 变量含义                              | 变量解释说明                             |
|-------|-----------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 整体网络  | 网络密度(D)   | $D=L/[N \times (N-1)]$                        | 实际关系数占最大可能关系数的比例,反映整体关联紧密程度       | $L$ 为空间网络实际呈现出的关系个数; $N$ 为空间网络节点个数 |
|       | 网络关联度(C)  | $C=1-V/[N \times (N-1)/2]$                    | 网络中不可达节点对数的比例,反映网络是否全域连通          | $V$ 为空间网络中不可达的节点对数                 |
|       | 网络等级度(H)  | $H=1-K/\max(K)$                               | 网络中非对称支配关系的强弱,值越高越依赖少数节点          | $K$ 为空间网络中对称的节点对数                  |
|       | 网络效率(E)   | $E=1-M/\max(M)$                               | 网络中冗余关联的多少,值越高,结构越精简              | $M$ 为空间网络中多余的关系个数                  |
| 中心性分析 | 度数中心度(DC) | $DC=O/(N-1)$                                  | 一个城市直接关联的其他城市数量,衡量其在网络中的活跃程度      | $O$ 为区域网络中与特定节点相关联的关系数量            |
|       | 接近中心度(CC) | $CC=\sum_{j=1}^N d_{ij}$                      | 一个城市到所有其他城市的最短路径之和,反映信息传递的通达性     | $d_{ij}$ 为区域 $i$ 和区域 $j$ 之间的最优距离   |
|       | 中介中心度(BC) | $BC=\frac{\sum_j \sum_k b_{jk}(i)}{N^2-3N+2}$ | 一个城市充当其他城市之间“桥梁”的频率,衡量其对资源流动的控制能力 | $b_{jk}$ 为区域 $j$ 和区域 $k$ 之间最优距离数量  |

1.2.8 变量筛选与多重共线性诊断 为避免自变量过多导致模型过拟合或共线性问题,同时识别对农业水资源效率具有关键影响的驱动因素,本文首先采用最小绝对收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)算法对表 2 中的 14 个潜在影响因素进行特征选择。LASSO 通过在传统最小二乘目标函数中引入基于 L1 范数的惩罚项,实现对回归系数的收缩与变量筛选<sup>[21]</sup>。其优化目标函数为:

$$S(\beta) = \|y - X\beta\|^2 + \lambda \|\beta\| \quad (7)$$

式中:  $y$  为农业水资源效率;  $X$  为解释变量矩阵;  $\beta$  为回归系数向量;  $\lambda$  为惩罚参数,通过交叉验证选择最优  $\lambda$  值。

在 LASSO 筛选出关键变量之后,为确保后续 GTWR 模型参数估计的准确性和稳定性,进一步采用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)对筛选后的变量进行多重共线性诊断。VIF 的计算公式为:

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (8)$$

式中:  $R_j^2$  为第  $j$  个解释变量对其他所有解释变量进行回归所得到的拟合优度。一般而言,若所有变量的 VIF 值均  $< 10$ ,则表明变量间不存在严重的多重共线性问题。

1.2.9 时空地理加权回归模型 为识别各影响因素对农业水资源效率的时空异质性,构建 GTWR 模型。该模型在地理加权回归(geographic weighted regression, GWR)基础上引入时间维度,能够同时捕捉参数在空间与时间上的动态变化<sup>[22]</sup>。

模型设定:被解释变量为 Super-SBM 测算得到的效率值,解释变量为 LASSO 筛选及 VIF 检验通过后的核心变量。作为对比,本文同时采用 GWR 和 OLS 进行估计。

$$Y_i = \alpha_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{j=1}^m \alpha_j(u_i, v_i, t_i) X_{ij} + \epsilon_i \quad (9)$$

式中:  $Y_i$  为效率值;  $n$  为城市数量;  $m$  为影响因素个数;  $(u_i, v_i)$  为空间坐标;  $t_i$  为时间坐标;  $\alpha_0(u_i, v_i, t_i)$  为时空截距项;  $X_{ij}$  为第  $j$  项影响因素;  $\alpha_j(u_i, v_i, t_i)$  为回归系数;  $\epsilon_i$  为随机误差项。GTWR 通过构建时空权重矩阵  $w_i(u_i, v_i, t_i) = w_i^s(u_i, v_i) \times w_i^t(t_i)$ ,将空间邻近性与时间接近性纳入局部回归框架。

GWR 仅考虑空间非平稳性:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) X_{i1} + \beta_2(u_i, v_i) X_{i2} + \dots + \beta_p(u_i, v_i) X_{ip} + \epsilon_i \quad (10)$$

式中:  $\beta_0(u_i, v_i)$  为截距项;  $X_{i1}$ 、 $X_{i2}$ 、 $\dots$ 、 $X_{ip}$  为解释变量;  $\beta_1(u_i, v_i)$ 、 $\beta_2(u_i, v_i)$ 、 $\dots$ 、 $\beta_p(u_i, v_i)$  为回归系数;  $\epsilon_i$  为误差项。

OLS 假设参数不随空间变化:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \cdots + \beta_k X_{ki} + \epsilon_i \quad (11)$$

式中:  $Y_i$  为因变量;  $\beta_0$  常数项;  $X_{1i}, X_{2i}, \cdots, X_{ki}$  为自变量;  $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_k$  为回归系数;  $\epsilon_i$  为误差项。

### 1.3 数据来源与处理

农业水资源效率投入产出及影响因素相关数据来源为: 1) 社会经济与农业生产数据, 包括第一产业就业人数、农业机械总动力、人均 GDP、产业结构、城镇化率、科技支出、财政支农水平等取自《中国城市统计年鉴(2015—2024)》<sup>[23]</sup> 及各省统计年鉴和统计公报(2015—2024)。有效灌溉面积、农药化肥施用量、农作物种植结构、农田有效灌溉率、农用地膜、柴油使用量、农业产值与粮食产量等指标, 取自《中国农村统计年鉴(2015—2024)》<sup>[24]</sup> 及各省涉农统计资料。2) 水资源与气候地理数据, 包括农业用水总量、人均水资源量源自 2014—2023 年《中国水资源公报》<sup>[25]</sup> 及省市水资源公报; 年平均降水量、年平均气温源自国家青藏高原科学数据中心发布的 1 km 分辨率逐年中国降水与气温数据集。为匹配研究时段与单元, 首先提取 2014—2023 年共 10 a 的栅格数据, 然后利用 ArcGIS 10.8 软件, 基于长江流域 64 个地级市的行政边界矢量图进行分区统计, 计算各城市行政范围内的气象要素平均值。3) 人口与教育数据, 包括人均受教育年限、总人口等源自中经网数据库及省市统计年鉴。4) 测算生成指标, 环境规制强度借鉴陈诗一等<sup>[26]</sup> 研究结果, 通过 Python 分词统计

64 个地级市政府工作报告关键词词频; 农业面源污染借鉴联合国指数权重逻辑, 采用均等权重法(各指标权重 0.25) 综合化肥、农药、农用地膜及柴油使用量 4 项指标计算所得<sup>[27]</sup>。少量缺失数据采用 StataMP 18 软件通过时间序列线性插值法补充。

## 2 结果与分析

### 2.1 农业水资源效率时空演变

2.1.1 时序特征 Super-SBM 模型测算结果表明, 2014—2023 年长江流域农业水资源效率持续提升, 但区域差异明显(图 2)。全流域农业水资源效率平均值由 2014 年 0.529 升至 2023 年 0.801, 年平均增长 4.72%。根据变化速率, 研究期可分为 3 个阶段: 2014—2017 年低速波动期, 效率平均值为 0.529~0.564; 2018—2020 年加速上升期, 效率平均值由 0.565 升至 0.662; 2021—2023 年高位增长期, 效率平均值由 0.713 升至 0.801。与此同时, 全流域变异系数由 2014 年 0.405 降至 2023 年 0.283, 降幅约 30.1%, 表明各市相对差距逐步缩小。区域上, 上游效率平均值最高(0.722), 其次是下游(0.654)和中游(0.563)。上游效率平均值从 2014 年 0.587 升至 2023 年 0.905, 变异系数由 0.396 降至 0.203, 降幅最为明显, 表明上游城市间的效率差距显著收窄。下游地区效率平均值由 0.559 上升至 0.829, 变异系数由 0.413 降至 0.288, 效率提升与差距缩小并存。中游地区效率平均值由 0.483 上升至 0.731, 但变异系数在研究期内波动较大, 2019 年后出现小幅反弹, 表明其内部效率分化仍较突出。

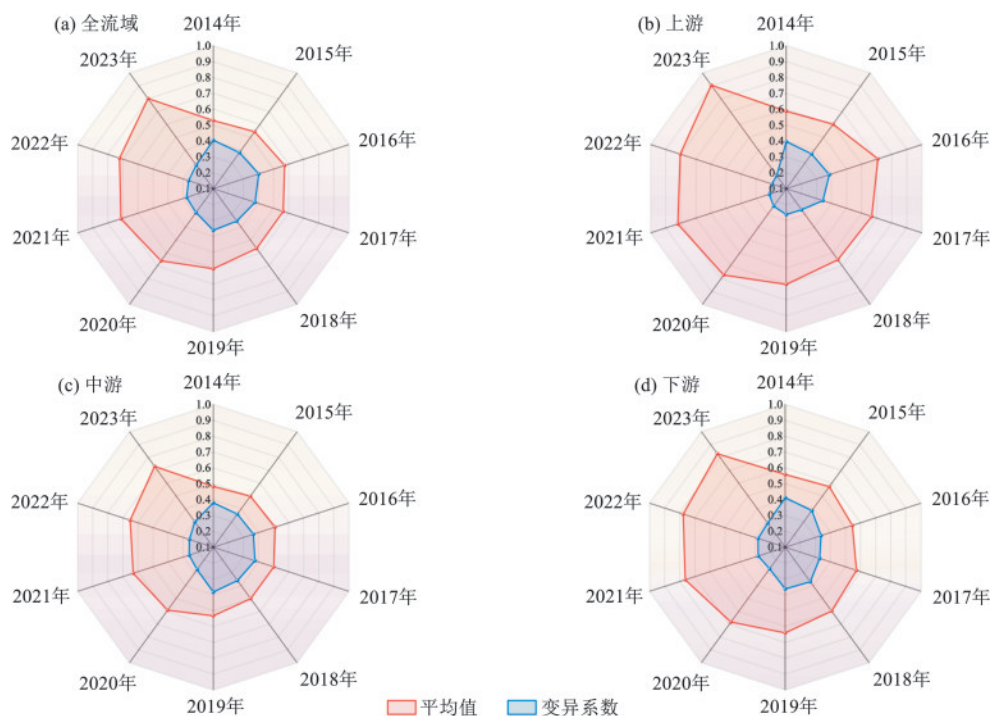


图 2 2014—2023 年农业水资源效率时序变化雷达图

Fig.2 Radar chart of temporal variation of agricultural water resource efficiency from 2014 to 2023

2014—2023年全域及上、中、下游农业水资源效率的核密度分布特征见图3。1)分布位置上,全域与分段区域效率均值核心区间均整体右移,表明各片区农业水资源利用水平稳步提升。其中全域与中游迁移明显,上、下游增速平缓。2)分布形态上,全流域及上游核密度曲线波峰总体升高、宽度扩大,说明整体效率提升、相对差异缩小的同时,内部城市绝对差异仍在扩大;中游波峰形态复杂,峰高波动且宽度

增加,与内部差异先降后升的特征一致;下游波峰总体升高、宽度收窄,内部差异趋于缩小。3)流域及各分段核密度曲线整体呈单峰形态演进,无明显两极分化,表明农业水资源效率分布相对集中,高低效率城市无明显效率断层。4)分布延展性上,2016年前全域与中游核密度曲线呈右侧拖尾,高值城市占比提升,优势突出;上、下游无明显拖尾,内部效率分布更均衡稳定。

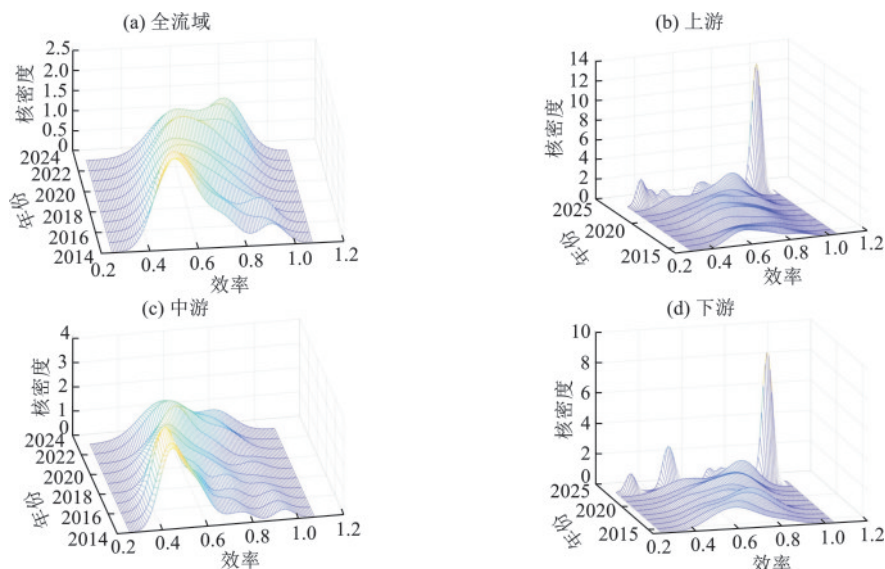


图3 2014—2023年农业水资源效率核密度分布特征

Fig.3 Kernel density patterns of agricultural water resource efficiency over the period 2014—2023

2.1.2 空间格局演进 2014年与2023年农业水资源效率的空间格局见图4。2014年,高效率城市仅7个,零散分布于上游自贡、泸州、达州及下游扬州、泰州等地,低效率城市多达29个,连片集中于中游鄂州、黄石、咸宁、长沙、株洲、湘潭、衡阳、邵阳、岳阳、常德、张家界、益阳、郴州、永州、怀化,以及下游芜湖、黄山、池州、宣城等地,形成中游至安徽南部的连片低值区。至2023年,高效率城市增至32个,上游四

川盆地自贡、攀枝花、德阳、宜宾、达州等11市与下游江苏沿江平原的南京、无锡、徐州、苏州、扬州、泰州等8市形成两大连续高值集聚区,低效率城市缩减至9个,仅存于黄石、鄂州、随州、张家界、郴州、怀化、黄山、池州、宣城。研究期内,效率空间格局由“低效率广泛覆盖、高效率孤立分布”逐步转变为“高效率连片集聚、低效率持续收缩”,上游与下游为效率增长主导区,中游山地丘陵区成为效率提升的薄弱环节。

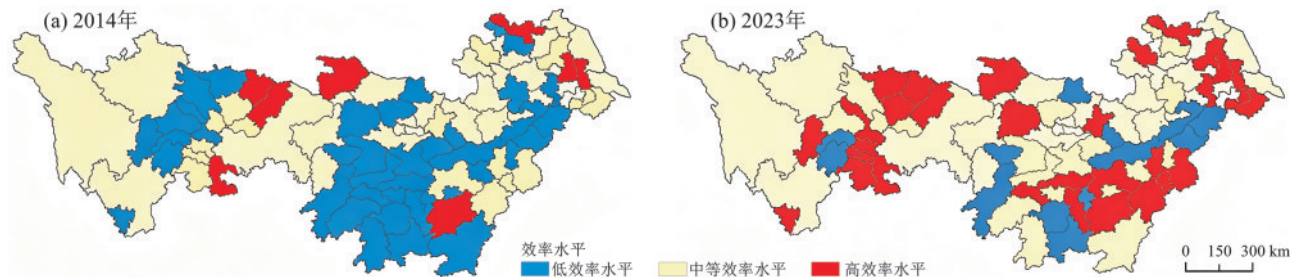


图4 2014年与2023年农业水资源效率空间格局对比

Fig.4 Comparison of spatial patterns of agricultural water resource efficiency between 2014 and 2023

## 2.2 空间关联网结构特征

2.2.1 整体网络特征 2014年与2023年的网络结构见图5。尽管网络密度下降、直接联系数量减少,但网络效率上升、等级度下降,表明冗余联系被优化,核心节点联系更紧密,网络结构由单边主导的“核心-

边缘”模式向多中心协同演进。网络中心由2014年宜宾、南充、徐州和合肥等城市演变为2023年徐州、合肥、南京、攀枝花和抚州等城市。其中徐州、合肥始终为核心节点,连接能力持续优化。怀化、娄底、池州等城市在空间关联网中处于边缘位置。

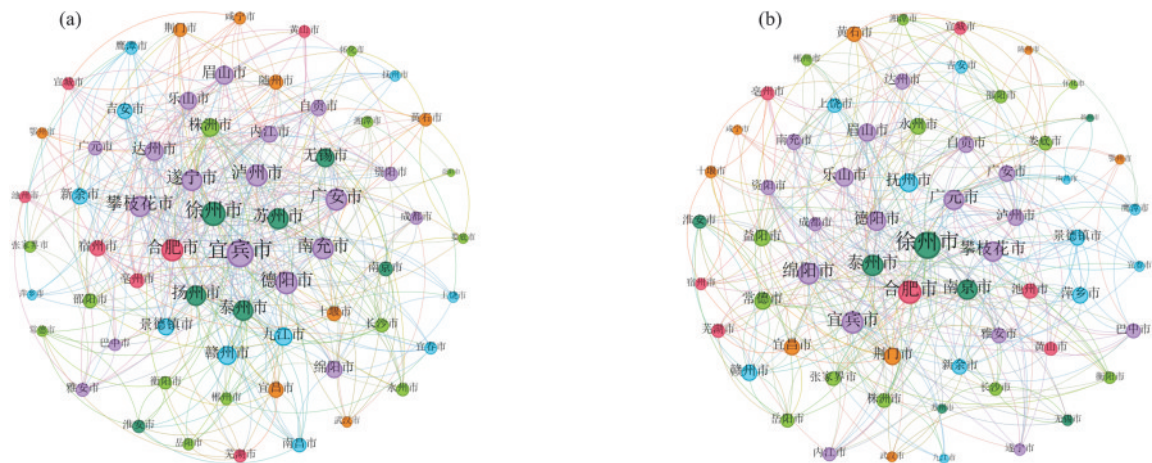


图 5 2014 年与 2023 年农业水资源效率空间关联网络的演变特征

Fig.5 Spatiotemporal changes of spatial network correlation for agricultural water resource efficiency in 2014 and 2023

从网络密度与关系数的时序演变来看(图 6), 2014 年长江流域农业水资源效率空间关联网络的密度为 0.105,网络关系数为 422 条。研究期内密度呈波动下降趋势,至 2023 年分别降至 0.097 及 391 条。其中,2018 年达到峰值,密度为 0.122,关系数为 492。

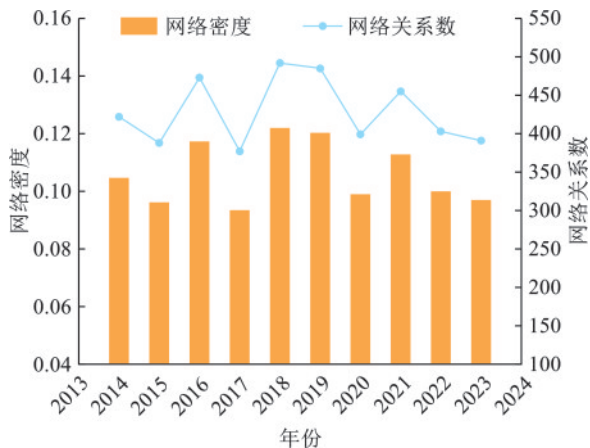


图 6 网络密度与网络关系数

Fig.6 Network density and quantity of network associations

从网络等级度与网络效率演进特征(图 7)可见,研究期内网络关联度恒为 1,整体网络处于全连通状态,所有城市均纳入空间关联体系。网络等级度由 2014 年的 0.853 降至 2023 年的 0.641,降幅约 24.9%,尤其在 2016 年降至 0.406 的低点,表明多中心、扁平化结构逐步替代单中心等级格局。网络效率由 2014 年 0.861 波动上升至 2023 年 0.874,冗余关联减少,正向空间溢出效应增强,整体结构趋于稳定。整体而言,长江流域农业水资源效率空间关联由“核心-边缘”模式向多中心协同转型,要素流动与资源配置持续优化。

2.2.2 节点中心性 各城市 2014 与 2023 年的 3 类中心度测算结果见图 8。

1)度数中心度平均值由 2014 年 16.617 略降至 2023 年 15.376,整体略有下降但“核心-边缘”结构依然显著。2014 年度数中心度高于平均值的城市主要

为宜宾(39.683)、徐州(36.508)、合肥(33.333)、南充(31.746)、苏州(31.746)、德阳(30.159)等,多分布于四川盆地及江苏、安徽等地区。2023 年高值节点转为徐州(41.270)、(合肥 31.746)、泰州(30.159)、攀枝花(28.571)、宜宾(26.984)、南京(25.397)等城市,其中徐州市度中心度由 36.508 升至 41.270,始终保持最强连接能力。而怀化 2014 年为 6.349,2023 年为 6.349,娄底分别为 6.349、12.698,黄山分别为 7.937、14.286,这些城市 2 个年份的度中心度长期低于平均值,处于网络边缘,空间关联较弱。

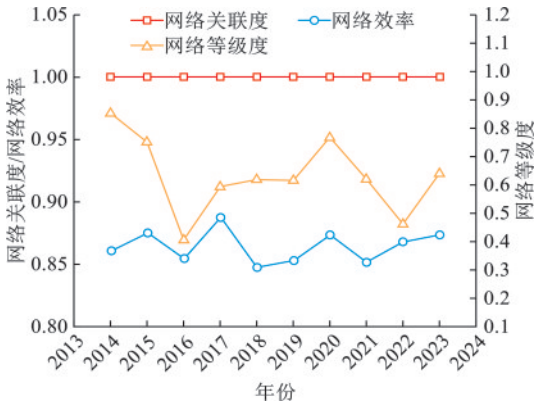


图 7 网络效率水平、网络等级度与网络关联强度

Fig.7 Network efficiency, hierarchical features and correlation intensity of the network

2)接近中心度平均值由 2014 年的 43.876 降至 2023 年的 42.178,网络整体通达性保持稳定。2014 年徐州为 60.144,2023 年为 61.765,合肥分别为 59.434、58.879,泰州分别为 54.310、56.757,南京分别为 46.667、55.752,攀枝花分别为 52.066、50.806,城市常年位居前列,连接广泛且资源传递效率高,是空间关联网络中的中心行动者。而怀化分别为 37.544、30.583,娄底分别为 37.512、37.725,池州分别为 33.158、37.952,黄山分别为 33.158、37.725,城市传递效率较低。

3)中介中心度平均值由2014年2.143升至2023年2.289,核心城市中介控制能力进一步增强。2014年中介中心度前5位的城市为苏州(11.331)、徐州(10.534)、合肥(10.180)、宜宾(8.432)、乐山(8.156)。2023年,前5位演变为徐州(23.749)、合肥(13.498)、攀枝花(10.883)、泰州(9.806)、南京(9.143),表明中介功能进一步向少数核心城市集聚。

徐州、合肥虽辐射带动作用增强,但其技术溢出与资源配置效应尚未有效覆盖边缘城市。2014年怀化为0、2023年为0,娄底分别为0、0.477,益阳分别为0、0.691,扬州分别为4.505、0,城市中介中心度长期处于极低水平,说明其缺乏对资源流动的中间调控能力,需借助核心城市的中介作用融入区域协同发展。

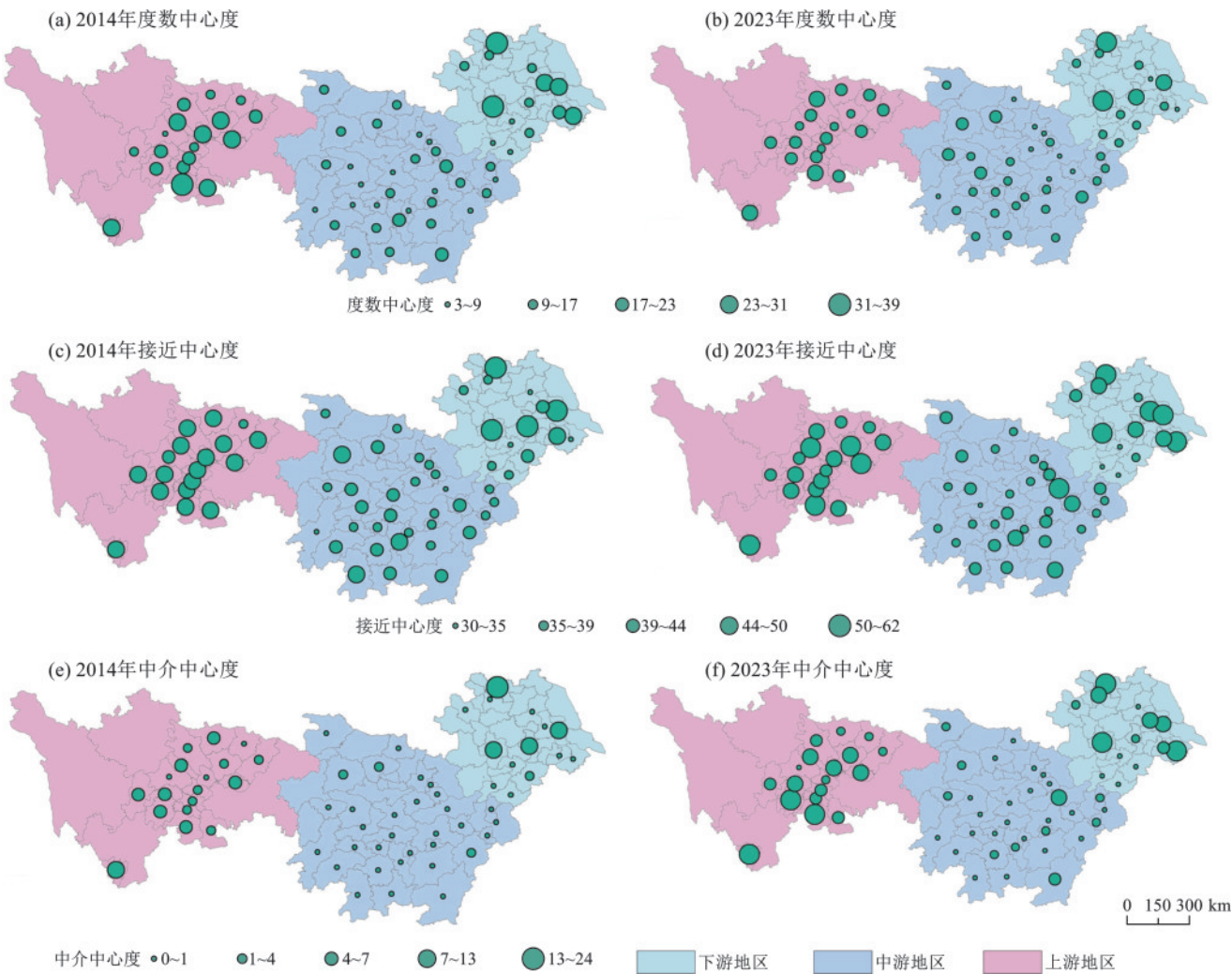


图8 2014年与2023年农业水资源效率网络节点中心性

Fig.8 Node centrality of agricultural water resource efficiency network in 2014 and 2023

2.3 长江流域农业水资源效率的驱动因素探究

2.3.1 基于Lasso回归的因子检验与筛选优化 本研究采用Lasso回归筛选关键变量(图9),红色虚线lambda.min对应均方误差最小,变量数为6;蓝色虚线lambda.1se为1个标准误差内的最优解,变量数为1,综合模型复杂度与有效信息保留,本文选取lambda.min,对应惩罚参数 $\lambda=0.0021$ 。经筛选确定6个核心变量,分别为年降雨量、人均GDP、农作物种植结构、农田有效灌溉率、人口素质水平和财政支农水平。

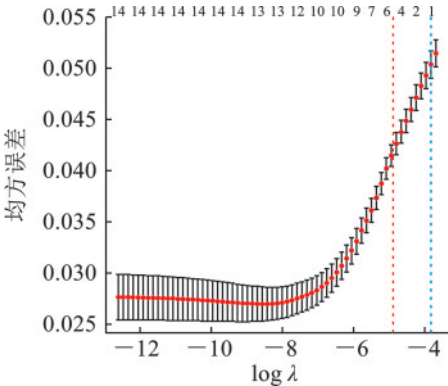


图9 Lasso回归交叉验证曲线

Fig.9 Curve of Lasso regression cross-validation

2.3.2 GTWR 模型统计结果 由表 4 可知,GTWR 模型的调整后  $R^2$  为 0.867,赤池信息量准则(corrected Akaike information criterion, AICc)为 -973.955,均优于最小二乘法(ordinary least squares, OLS)和 GWR 模型,表明 GTWR 模型拟合效果最佳,能够有效捕捉各驱动因素的时空非平稳性。

| 表 4 模型比较                 |          |          |          |
|--------------------------|----------|----------|----------|
| Table 4 Model comparison |          |          |          |
| 模型参数                     | OLS      | GWR      | GTWR     |
| 带宽                       | —        | 0.115    | 0.115    |
| Sigma                    | —        | 0.101    | 0.081    |
| AICc                     | -504.450 | -911.350 | -973.955 |
| $R^2$                    | 0.506    | 0.803    | 0.870    |
| $R^2$ -Adjusted          | 0.505    | 0.799    | 0.867    |

2.3.3 影响因素的时间异质性 基于 GTWR 模型测度 2014—2023 年各因素拟合系数,时间演化趋势见图 10。

1)年降水量:回归系数以负值为主,整体呈先下降后回升的“U”形演变特征,负向制约作用在 2019 年

达到极值,2019—2023 年有缓解但仍维持负向影响。

2)人均 GDP:系数以正值为主,正向驱动显著且趋于收敛。2014—2017 年系数分布离散,区域分化明显,2018—2023 年趋于收敛且保持显著的正向推动作用。

3)农作物种植结构:系数以正值为主,局部为负值。2014—2019 年保持相对稳定,2020—2023 年系数下降且离散度增大,表现出明显的阶段性波动特征。

4)农田有效灌溉率:系数以负值为主,负向效应先扩大后收缩。2014—2016 年负向效应显著,2017—2020 年节水改造有所缓解,2021 年后趋于收敛,但始终未转为正向驱动。

5)人口素质水平:系数总体以正值为主,正向作用存在阶段性波动。2014—2017 年系数离散度较大,而在 2018—2023 年区域差异逐步收敛。

6)财政支农水平:系数总体以正值为主,正向作用呈波动变化。2014—2016 年区域差异较明显,2017—2023 年正向驱动效果显著增强,系数离散度逐步收敛。

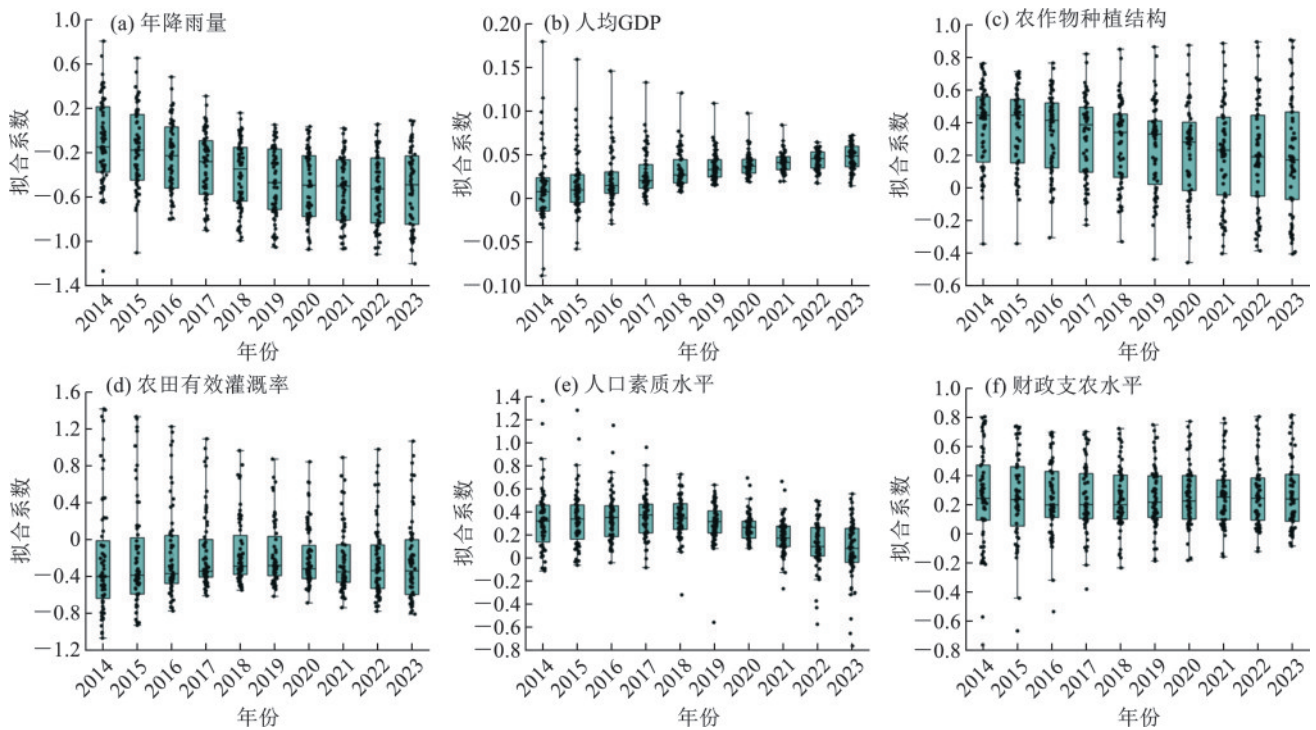


图 10 2014—2023 年农业水资源效率驱动因子回归系数时序演变特征

Fig.10 Temporal evolution characteristics of regression coefficients for driving factors of agricultural water resource efficiency from 2014 to 2023

2.3.4 影响因素的空间异质性 为揭示影响因素的空间异质性,基于 GTWR 模型计算各城市回归系数均值,运用 ArcGIS 自然断点法绘制 64 个城市空间分布图(图 11)。年降雨量系数以负值为主,呈上下游负向效应较强、中游较弱的格局(图 11a)。高值区集中在中游萍乡(0.008)、赣州(0.048)、吉安(0.021)、新

余(-0.002)和宜春(-0.026)等地,低值负向区为上游乐山(-0.931)、宜宾(-0.925)、雅安(-0.880)、攀枝花(-0.769)、泸州(-0.819)、眉山(-0.816)、自贡(-0.820)和内江(-0.724),下游集中在苏州(-0.739)、无锡(-0.716)、南京(-0.667)、泰州(-0.710)、扬州(-0.689)、淮安(-0.649)和徐州(-0.565)等地。

人均GDP系数以正为主,呈上下游高值集聚、中游相对偏低的格局(图11b)。高值区为上游成都(0.063)、自贡(0.060)、攀枝花(0.113)、德阳(0.055)、内江(0.056)、雅安(0.079)、乐山(0.073)及宜宾(0.062),下游南京(0.025)、无锡(0.020)、苏州(0.018)、淮安(0.021)、扬州(0.020)和泰州(0.018)等地;低值区为中游长沙(0.003)、株洲(0.013)、湘潭(0.010)、岳阳(0.002)、常德(0.035)、衡阳(0.018)、益阳(0.019)、永州(0.021)及上游达州(-0.003)等地。

农作物种植结构系数呈“中游偏高、上下游低”格局,中游南北梯度明显(图11c)。高值区为中游赣州(0.783)、郴州(0.811)、永州(0.685)、吉安(0.625)、抚州(0.619)、鹰潭(0.586)、新余(0.575)、宜春(0.560)、衡阳(0.553)和萍乡(0.524)等地,低值区为上游成都(-0.044)、自贡(-0.110)、攀枝花(-0.266)、泸州(-0.159)、乐山(-0.148)、宜宾(-0.158)、眉山(-0.096)及下游苏州(0.330)、无锡(0.335)、南京(0.343)、扬州(0.326)和泰州(0.316)等地。

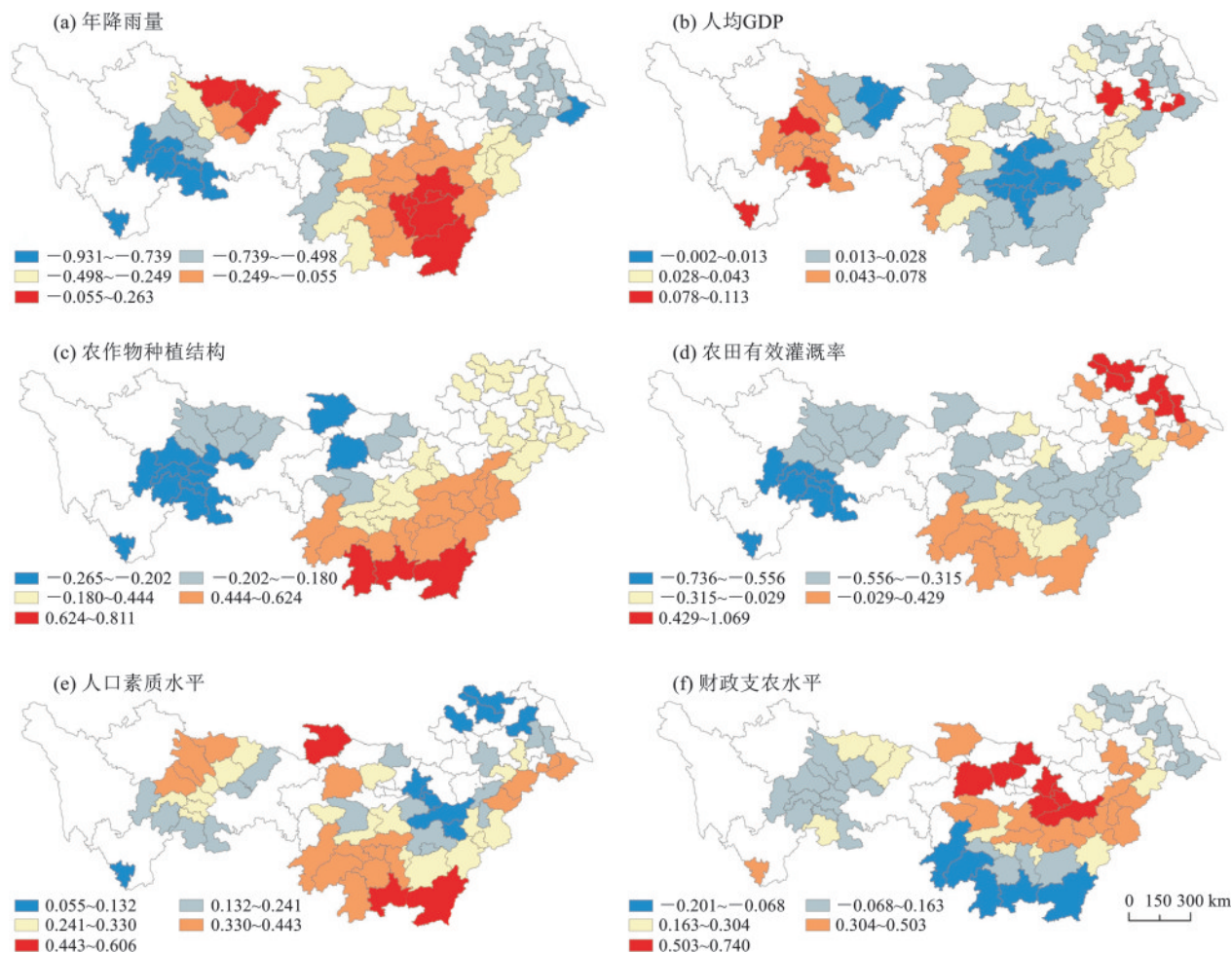


图11 2014—2023年农业水资源效率驱动因素回归系数平均值空间格局

Fig.11 Spatial pattern of the mean regression coefficients for driving factors of agricultural water resource efficiency from 2014 to 2023

农田有效灌溉面积占比系数呈下游正向显著、中上游负向为主格局(图11d)。高值区为下游徐州(1.070)、淮安(0.920)、泰州(0.811)、宿州(0.818)、扬州(0.784)、苏州(0.493)、无锡(0.437)、南京(0.365)和亳州(0.389);低值区为上游攀枝花(-0.737)、宜宾(-0.702)、泸州(-0.682)、乐山(-0.664)、自贡(-0.606)、内江(-0.557)、雅安(-0.618)、眉山(-0.563)及宜昌(-0.479)、十堰(-0.389)、张家界(-0.400)、常德(-0.349)等地。

人口素质水平系数全域为正,呈“中游偏高、上

游居中、下游偏低”格局(图11e)。高值区为中游十堰(0.530)、赣州(0.500)、郴州(0.460)、宜昌(0.369)、永州(0.369)、株洲(0.382)、湘潭(0.389)、荆门(0.307)等地;低值区为上游攀枝花(0.115)、泸州(0.171)、宜宾(0.198)、自贡(0.261)、达州(0.215)及下游宿州(0.131)、亳州(0.097)、淮安(0.132)和徐州(0.119)等地。

财政支农水平系数以正值为主,呈“中游偏高、上下游偏低”格局(图11f)。高值区为中游随州(0.740)、荆门(0.730)、宜昌(0.698)、武汉(0.687)、鄂

州(0.668)、黄石(0.640)、咸宁(0.617)和荆州(0.673)等地;低值区为上游成都(0.087)、自贡(0.121)、泸州(0.147)、眉山(0.115)、雅安(0.148)及下游徐州(0.007)、淮安(0.066)、宿州(0.076)、扬州(0.092)和泰州(0.070)等地。

### 3 讨论

从效率时空演变来看,研究期内长江流域农业水资源效率稳步提升,呈现“上游领先、下游居中、中游偏弱”的空间分异格局,高效率区集聚于四川盆地与下游平原、低效率区集中于中游山地丘陵区及沿江传统农区,与李玉文等<sup>[28]</sup>关于长江流域农业用水绿色效率空间格局的研究结果基本一致。值得注意的是,全域效率差异虽逐步收敛,但中游内部分化在2019年后出现加剧,变异系数呈明显反弹。探究其原因,2019年《长江保护修复攻坚战行动计划》<sup>[29]</sup>的全面实施,对中游不同城市形成差异化冲击。一方面,经济基础较好的城市如武汉、长沙等凭借较高的人均GDP和财政支农水平,能够迅速响应政策,率先推进节水技术改造和种植结构优化,农业水资源效率得以持续提升;另一方面,部分欠发达城市如怀化、张家界等受限于财政能力和传统产业结构,在面对更严格的环保约束时转型缓慢,加之这些地区年降雨量丰沛,但坡面径流损失严重、灌溉设施老化,水土保持措施薄弱,导致区域内部改善不均衡,印证了黄晓慧等<sup>[30]</sup>提出的粮食主产区效率提升存在明显区域短板的结论。

在空间关联网络方面,农业水资源效率的空间网络密度波动下降、等级度降低、网络效率上升,表明网络结构由传统的“核心-边缘”模式逐步向扁平化、多中心方向演进,值得注意的是,网络密度在2018年达到峰值,主要得益于当年国家防总正式批复《2018年度长江上中游水库群联合调度方案》,纳入联合调度的水库从2017年的28座增至2018年的40座,调度范围首次延伸至湖口断面以上,实现上、中游全覆盖<sup>[31]</sup>。徐州、合肥始终保持核心枢纽地位,与其较高的经济发展水平、较大的财政支农力度及明显的区位优势密切相关,使其能够有效集聚和辐射节水技术与管理经验,而怀化、娄底、池州等城市长期处于网络边缘,主要受制于相对滞后的经济基础、有限的人力资本水平及薄弱的基础设施,导致其承接技术溢出的能力不足,难以融入核心城市主导的协同网络,此结果验证了郝铭等<sup>[32]</sup>提出的长江与黄河流域农业水资源利用存在显著空间联动性的判断,这也表明节水技术与水土保持综合治理的空间溢出存在路径依赖,核心城市辐射带动尚未有效覆盖山区和边缘城市。

从驱动因素来看,GTWR结果表明影响因素具

有显著时空异质性,其内在机理与流域的自然条件、经济发展阶段及政策干预密切相关,不同区域的主导因素和作用方向存在明显差异。年降雨量整体呈负向制约<sup>[33]</sup>。其中上游四川盆地地形起伏大、坡面径流损失严重,传统用水粗放且集雨措施不足;下游平原区农业用水精细化管理水平不高,降雨增加反而可能加剧面源污染<sup>[34]</sup>;而中游萍乡、赣州等地因小流域综合治理和坡耕地改造,雨水资源化利用提升,呈现局部正向效应。人均GDP的正向驱动作用在上下游更为显著。长三角地区经济基础雄厚,为节水技术和智慧灌区建设提供资金支撑,形成经济、技术与效率的良性循环;中游部分地区经济发展水平相对滞后,受传统产业结构制约,节水投入的内生动力不足。农作物种植结构在中游江西、湖南呈现高值正向效应,得益于高标准农田建设与稻渔共生等模式的协同<sup>[35]</sup>;而上游攀枝花、宜宾等地以高耗水经济作物为主,下游苏南地区因城镇化和工业化挤占粮食生产,经济作物扩张对灌溉效率产生负向挤压。农田有效灌溉率的负向作用在中上游山区尤为突出,有效灌溉面积虽占比较高,但设施老化、渠系配套不全,仍以传统地面灌溉为主,高覆盖率并未伴随节水技术的同步普及,反而固化粗放用水模式<sup>[36]</sup>;加之灌溉保障增强后,农户可能减少节水或扩大高耗水作物种植,产生“效率悖论”,与邓椿等<sup>[37]</sup>在黄河流域得出的水资源禀赋与基础设施并非越高越好的结论一致;经济水平、人力资本与财政投入的正向驱动作用,印证薛选登等<sup>[38]</sup>提出的“经济支撑、政策引导、人力保障是农业水资源效率提升核心动力”的观点。与已有研究相比,本研究进一步量化了各因素在不同区段、不同年份的作用强度差异,从水土保持与灌区协同视角揭示效率分异机理,可为流域差异化施策提供更精细依据。

### 4 结论

1)2014—2023年长江流域农业水资源效率呈持续提升态势,区域差异逐步收敛,但上中下游分异格局显著。高效率区域由零散分布转向连片集聚,主要集中于上游四川盆地与下游沿江平原,中游山地丘陵区受地形条件、灌溉设施配套不足及水土保持措施薄弱的影响,成为农业水资源效率与水土保持协同提升的短板区域。因此,中游山区应作为未来流域治理的优先区域,将坡耕地水土流失治理与灌区节水改造纳入统一规划,二者需协同推进。

2)农业水资源效率空间关联网络保持全域连通,整体向扁平化、多中心方向发展,网络运行效率不断提升。徐州、合肥为核心枢纽,南京、攀枝花、抚

州等节点城市的辐射与联动作用持续增强,怀化、娄底、池州、黄山等城市长期处于边缘,区域协同节水与技术溢出机制尚未充分覆盖低连接度地区。表明仅靠市场机制难以自发形成对边缘城市的带动作用,需要跨行政区的生态补偿、水权交易及流域层面的协同治理等制度安排,主动构建核心与边缘城市之间的资源与信息传递通道。

3)农业水资源效率的驱动因素时空异质性显著。时间上,年降雨量、农田有效灌溉率以负向制约为主,人均GDP、种植结构、人口素质、财政支农以正向驱动为主且作用增强。空间上,降雨量负向效应集中体现在上下游地区,上游因地形起伏导致坡面径流损失大,下游则因降水增加加剧面源污染;农田有效灌溉率负向效应集中于中上游山区,设施以传统地面灌溉为主,未能实现精准控水,反而加剧用水粗放;经济水平、种植结构、财政支农与人口素质的正向效应存在明显区段差异,下游平原与中游粮食主产区成为正向驱动的关键区域。据此,上游应侧重坡面集雨工程与灌区现代化改造,下游继续推广智慧灌溉与高标准农田建设,中游则需在不削弱粮食产能的前提下,提高节水技术的配套比例和管理精度。

#### 参考文献:

- [1] 黄万华,王梦迪,高红贵.长江流域水资源管理绩效水平测度及时空分异[J].统计与决策,2022,38(20):48-53.  
Huang Wanhua, Wang Mengdi, Gao Honggui. Measurement of performance level of water resources management in the Yangtze River basin and spatiotemporal differentiation[J]. Statistics and Decision, 2022, 38(20): 48-53.
- [2] 吕玲玲.人与自然和谐共生:“水-岸”协同治理机制与策略创新[J].江苏社会科学,2024(4):168-176.  
Lü Lingling. Harmonious symbiosis between man and nature: The mechanism and strategy innovation of "water-shore" collaborative governance[J]. Jiangsu Social Sciences, 2024(4): 168-176.
- [3] 袁伏麒,刘廷玺,籍健勋,等.河套灌区所在流域水分利用效率演变及其对生态系统服务功能的响应[J].水土保持学报,2026,40(3):339-350.  
Yuan Fuqi, Liu Tingxi, Ji Jianxun, et al. Evolution of water use efficiency in the basin where Hetao irrigation district is located and its response to ecosystem service functions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 339-350.
- [4] 白芳芳,齐学斌,乔冬梅,等.黄河流域九省区农业水资源利用效率评价和障碍因子分析[J].水土保持学报,2022,36(3):146-152.  
Bai Fangfang, Qi Xuebin, Qiao Dongmei, et al. Evaluation of agricultural water resource utilization efficiency and obstacle factor diagnoses in nine provinces of the Yellow River basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 146-152.
- [5] 马剑锋,王慧敏,佟金萍.技术进步与效率追赶对农业用水效率的空间效应研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(7):36-45.  
Ma Jianfeng, Wang Huimin, Tong Jinping. Research on spatial effects of technological progress and efficiency catch-up on agricultural water use efficiency[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(7): 36-45.
- [6] Lu Weinan, Liu Wenxin, Hou Mengyang, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of agricultural water use efficiency in northwest China: Based on a super-DEA model and a spatial panel econometric model[J]. Water, 2021, 13(5): e632.
- [7] 鲁仕宝,张樊,裴亮,等.能源-粮食关联视角下的我国五大典型区水资源安全[J].水土保持学报,2026,40(1):219-230.  
Lu Shibao, Zhang Fan, Pei Liang, et al. Evaluation of water resource security in China's five typical regions from the perspective of energy-food nexus[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1): 219-230.
- [8] 李文博,姜博文,王晶滢.吉林省西部盐碱地综合开发多情景模拟与水资源效应[J].水土保持学报,2024,38(3):159-167.  
Li Wenbo, Jiang Bowen, Wang Jingying. Multi-scenario simulation and water resource effects of integrated utilization of saline-alkali land in western Jilin Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 159-167.
- [9] 熊哲超,黄涛珍,叶晨晨.中国数字经济与水资源绿色效率耦合协调度时空演化与影响因素研究[J].干旱区资源与环境,2025,39(12):26-38.  
Xiong Zhechao, Huang Taozhen, Ye Chenchen. Spatio-temporal evolution and influencing factors of coupling coordination between digital economy and green efficiency of water resources in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025, 39(12): 26-38.
- [10] 王蕾,许嘉伟,张晨哲.农业用水效率时空格局演化及驱动因素研究:基于长江经济带与黄河流域的比较[J].长江流域资源与环境,2024,33(11):2391-2409.  
Wang Lei, Xu Jiawei, Zhang Shengzhe. Spatial and temporal evolution and driving factors of agricultural water use efficiency: A comparison between the Yangtze River economic belt and the Yellow River basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(11): 2391-2409.
- [11] 余艳锋,杨苡若,袁婷婷.粮食主产区农业科技创新与粮食产能提升的协同性及驱动因素研究:基于三大流域视角[J/OL].中国农业资源与区划,1-23[2026-05-20].https://link.cnki.net/urlid/11.3513.s.20260311.1427.010.  
Yu Yanfeng, Yang Yiruo, Yuan Tingting. Research on

- the synergy and driving factors of agricultural science and technology innovation and grain production capacity improvement in major grain producing areas: From the perspective of three major river basins [J/OL]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 1-23 [2026-05-20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.s.20260311.1427.010>.
- [12] 吴学兵, 龚芳, 叶云. 中国农业用水绿色效率的区域差异及收敛性[J]. 中国农村水利水电, 2023(6): 196-201.  
Wu Xuebing, Gong Fang, Ye Yun. Regional differences and convergence of green efficiency of agricultural water use in China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(6): 196-201.
- [13] 杨兴洪, 堵朵. 粮食主产区农业用水绿色效率区域差异及影响因素研究[J]. 节水灌溉, 2023(6): 19-26.  
Yang Xinghong, Du Duo. Regional differentiation and influencing factors of green efficiency of agricultural water resources in major grain producing areas [J]. Water Saving Irrigation, 2023(6): 19-26.
- [14] 张扬, 郭彤彤, 张子恺. 农业绿色水资源利用与农业经济增长脱钩关系研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(11): 103-113.  
Zhang Yang, Guo Tongtong, Zhang Zikai. Research on the decoupling relationship between agricultural green water resources utilization and agricultural economic growth [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(11): 103-113.
- [15] 方芳, 张立杰, 赵军. 制度组态视角下提升农业绿色全要素生产率的多元路径探析: 基于动态 QCA 的面板数据分析[J]. 中国农村经济, 2024(2): 44-66.  
Fang Fang, Zhang Lijie, Zhao Jun. Multiple paths of agricultural green total factor productivity improvement from the perspective of institutional grouping: A panel data analysis based on dynamic QCA [J]. Chinese Rural Economy, 2024(2): 44-66.
- [16] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于 SBM-Malmquist 生产率指数模型的中国水资源绿色效率变动研究[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 993-1005.  
Sun Caizhi, Ma Qifei, Zhao Liangshi. Green efficiency changes for water resources in China based on SBM-Malmquist model [J]. Resources Science, 2018, 40(5): 993-1005.
- [17] Nguyen P H, Nguyen L T, Le Hongquan. Cross-national study on energy and innovation efficiency in Asia: A two-stage DEA super-SBM and malmquist framework [J]. Journal of the Knowledge Economy, 2026, 17(2): 4499-4528.
- [18] 任晓松, 梁宇琪, 赵敏, 等. 中国建筑业减污降碳协同效应的空间收敛性及驱动因素分析[J]. 环境科学研究, 2025, 38(4): 724-735.  
Ren Xiaosong, Liang Yuqi, Zhao Min, et al. Analysis of spatial convergence and driving factors of synergistic effects of pollution and carbon reduction in china's construction industry [J]. Research of Environmental Sciences, 2025, 38(4): 724-735.
- [19] 陈小龙, 狄乾斌. 区域高质量发展的空间联系及辐射效应研究: 以辽宁沿海经济带为例[J]. 地理科学进展, 2023, 42(11): 2126-2142.  
Chen Xiaolong, Di Qianbin. Spatial connection and radiation effect of regional high-quality development: A case study of the Liaoning coastal economic belt [J]. Progress in Geography, 2023, 42(11): 2126-2142.
- [20] 孙才志, 孙贞贞. 山西省水-能源-粮食纽带系统效率研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 69-80.  
Sun Caizhi, Sun Zhenzhen. Research on the efficiency of water-energy-food linkage system in Shanxi Province [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 69-80.
- [21] 焦柳丹, 王艺洁, 霍小森, 等. 基于 Lasso-GWO-RF 模型的长江上游交通碳排放预测[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2026, 45(4): 54-60.  
Jiao Liudan, Wang Yijie, Huo Xiaosen, et al. Carbon emission prediction of traffic in the Upper Yangtze River based on Lasso-GWO-RF model [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2026, 45(4): 54-60.
- [22] 傅玮韡, 余沁轩, 王怡萱, 等. 基于 GTWR 模型的新质生产力对碳排放强度的影响效应及时空分异特征研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2026, 47(5): 530-542.  
Fu Weiwei, She Qinxue, Wang Yixuan, et al. Research on the impact effect and spatiotemporal differentiation characteristics of neo-productive forces on carbon emission intensity based on GTWR model [J]. Journal of China West Normal University (Natural Science), 2026, 47(5): 530-542.
- [23] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 (2015—2024) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015—2024.  
Department of Urban Social and Economic Survey, National Bureau of Statistics of China. China urban statistical yearbook (2015—2024) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015—2024.
- [24] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴 (2015—2024) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015—2024.  
Department of Rural Social and Economic Survey, National Bureau of Statistics of China. China rural statistical yearbook (2015—2024) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2015—2024.
- [25] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 (2014—2023) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014—2023.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin (2014—2023) [M]. Beijing: China Water and Power Press, 2014—2023.
- [26] 陈诗一, 陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展

- [J]. 经济研究, 2018, 53(2): 20-34.
- Chen Shiyi, Chen Dengke. Air pollution, government regulations and high-quality economic development [J]. Economic Research Journal, 2018, 53(2): 20-34.
- [27] 姜松, 周洁, 邱爽. 适度规模经营是否能抑制农业面源污染: 基于动态门槛面板模型的实证[J]. 农业技术经济, 2021(7): 33-48.
- Jiang Song, Zhou Jie, Qiu Shuang. Can appropriate scale operation restrain agricultural non-point source pollution? Empirical study based on dynamic threshold panel model [J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2021(7): 33-48.
- [28] 李玉文, 潘季芳. 长江流域农业用水绿色效率动态变化及驱动因素研究: 基于超效率SBM模型和Tobit模型[J]. 上海国土资源, 2025, 46(1): 1146-1154.
- Li Yuwen, Pan Jifang. Study on the dynamic changes and driving factors of green efficiency of agricultural water use in the Yangtze River Basin: Based on super-efficient SBM model and Tobit model [J]. Shanghai Land and Resources, 2025, 46(1): 1146-1154.
- [29] 常纪文. 深入打好长江保护修复攻坚战 进一步促进长江流域绿色发展[J]. 中国环境监察, 2022(12): 34-36.
- Chang Jiwen. Fight hard for the protection and restoration of the Yangtze River and further promote the green development of the Yangtze River basin [J]. China Environment Supervision, 2022(12): 34-36.
- [30] 黄晓慧, 杨飞. 农业技术进步下的农业用水反弹效应及特征: 基于长江中下游粮食主产区省级面板数据[J]. 节水灌溉, 2022(6): 107-111.
- Huang Xiaohui, Yang Fei. Rebound effect and characteristics of agricultural water under agricultural technological progress: Based on provincial panel data of the main grain producing areas in the lower Yangtze region [J]. Water Saving Irrigation, 2022(6): 107-111.
- [31] 杨晶晶, 续衍雪, 马乐宽, 等. 长江流域“十五五”生态环境保护思路探析[J]. 长江流域资源与环境, 2026, 35(1): 132-141.
- Yang Jingjing, Xu Yanxue, Ma Lekuan, et al. Discussion on ecological environment protection strategies for the Yangtze River basin in the 15th Five-Year Plan [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2026, 35(1): 132-141.
- [32] 郝铭, 段琳琼, 陈常优, 等. 黄河流域与长江经济带农业水资源利用效率与影响因素的差异性研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 267-277.
- Hao Ming, Duan Linqiong, Chen Changyou, et al. Differences in agricultural water use efficiency and its influencing factors between Yellow River basin and Yangtze River economic belt [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 267-277.
- [33] 郑炎辉, 汪丽娜, 陈晓宏, 等. 基于超效率SBM模型的广东地区农业用水效率及影响因素[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2025, 57(5): 48-55.
- Zheng Yanhui, Wang Lina, Chen Xiaohong, et al. Agricultural water use efficiency and influencing factors in Guangdong region based on super-efficiency SBM model [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2025, 57(5): 48-55.
- [34] 郝新, 高吉喜, 谢成玉, 等. 长江中下游地区农业面源污染流失特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(12): 2765-2775.
- Hao Xin, Gao Jixi, Xie Chengyu, et al. Loss characteristics and risk assessment of agricultural non-point source pollution in the middle and lower Yangtze region [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(12): 2765-2775.
- [35] 杨斌, 石晓妍, 刘逸飞, 等. 气候变化与人类活动对长江流域粮食生产效率的影响及政策启示[J]. 自然资源学报, 2026, 41(3): 892-908.
- Yang Bin, Shi Xiaoyan, Liu Yifei, et al. The impact of climate change and human activities on grain production efficiency in the Yangtze River basin and its policy implications [J]. Journal of Natural Resources, 2026, 41(3): 892-908.
- [36] 康绍忠. 中国农业节水十年: 成就、挑战及对策[J]. 中国水利, 2024(10): 1-9.
- Kang Shaozhong. Ten years of agricultural water-saving in China: Achievements, challenges and measures [J]. China Water Resources, 2024(10): 1-9.
- [37] 邓椿, 蒋晓辉. 黄河流域农业水资源绿色效率动态演化及驱动机理[J]. 经济问题, 2023(9): 122-128.
- Deng Chun, Jiang Xiaohui. Dynamic evolution and driving mechanism of green efficiency of agricultural water resources in the Yellow River basin [J]. On Economic Problems, 2023(9): 122-128.
- [38] 薛选登, 宋沛怡. 环境规制下农业水资源绿色效率时空分异及驱动因素分析: 以黄河流域九省为例[J/OL]. 中国农业资源与区划, 1-15 [2026-05-20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20251106.1321.002>.
- Xue Xuandeng, Song Peiyi. Spatial differentiation and driving factors analysis of green efficiency of agricultural water resources under environmental regulation: A case study of nine provinces in the Yellow River basin [J/OL]. Chinese Agricultural Resources and Regional Planning, 1-15 [2026-05-20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20251106.1321.002>.