张永凯,高明敏.黄河流域绿色全要素生产率时空演化及水资源约束的门槛效应[J].中国沙漠,2026,46(5):221-232.

黄河流域绿色全要素生产率时空演化及水资源约束的门槛效应

张永凯[ab],高明敏[a]

(兰州财经大学 a.农林经济管理学院, b.资源环境与城乡规划研究中心, 甘肃 兰州 730101)

摘要:本文采用包含非期望产出的超效率SBM模型,测度2006—2022年黄河流域81个地级市绿色全要素生产率(GTFP),并综合运用核密度估计、空间马尔科夫链和面板门槛回归模型,考察GTFP的时空演化及水资源约束的门槛效应。结果表明:黄河流域城市GTFP总体呈上升趋势,形成下游领先、中游分化、上游追赶的梯度格局;低效率和高效率城市均存在较强路径依赖与俱乐部趋同,邻近区域环境对城市GTFP跃迁具有非对称影响。门槛回归结果表明,水资源约束显著改变产业集聚的绿色效应:制造业集聚对GTFP呈倒U型影响,仅在中度约束区间显著促进;生产性服务业集聚的促进作用随约束增强而递减;产业协同集聚在高约束区间抑制显著。黄河流域产业绿色转型不能简单依赖集聚规模扩张,应把水资源刚性约束、水权配置和产业功能协同纳入统一治理框架。

关键词:绿色全要素生产率;时空演化;门槛效应;水资源约束;黄河流域

文章编号:1000-694X(2026)05-221-12 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00120

中图分类号:F205 **文献标志码**:A

0 引言

绿色发展强调在资源环境约束下提升经济增长质量,以更少的资源消耗和环境代价实现更高质量的经济产出。作为衡量区域绿色发展水平的重要指标,绿色全要素生产率(GTFP)兼顾经济产出效率、资源消耗和污染排放,能够较为全面地反映经济增长的质量与环境代价。黄河流域是中国重要生态屏障和能源基地,长期承担资源开发、能源供给和产业承载功能,煤炭、电力、化工、有色金属等产业占比较高,经济增长对水资源和环境容量的依赖较强。然而,该流域水资源短缺和时空分布不均的问题突出,传统依靠资源消耗和规模扩张的发展方式难以持续。因此,黄河流域绿色发展不能仅关注经济规模扩大,还要考察产业空间布局对绿色效率的影响。产业集聚作为产业空间组织的重要形式,可通过专业化分工、知识溢出和服务配套提升GTFP;然而,如果集聚过程以高耗水产业扩张为主,则可能强化用水竞争和环境负荷,抑制绿色效率提升。对于水资源约束较强的黄河流域而言,产业集聚能否促进GTFP提升,很大程度上取决于水资源约束强度。适度约束有助于倒逼企业开展节水改造和清洁生产,使集聚优势转化为绿色效率提升;过强约束则可能抬高生产和治理成本,削弱产业集聚对GTFP的促进作用。因此,产业集聚对GTFP的影响并非简单线性关系,而可能因水资源约束强度和产业集聚类型不同呈现异质性。

现有研究主要围绕水资源约束、产业集聚与GTFP展开,成果主要呈现出三方面特征:第一,在效率测度方法上,针对GTFP测算中存在的投入冗余与非期望产出问题,超效率SBM模型凭借其处理多投入、多产出及非期望产出的优势,成为当前学界测度GTFP的主流方法[1-2];Fu等[3]则结合改进SBM模型与Malmquist-Luenberger指数,优化了绿色效率测算体系。第二,在影响机制研究方面,学界重点关注了产业集聚与绿色发展的内在关联[4-6]。

收稿日期:2026-05-29; **改回日期**:2026-07-02

资助项目:甘肃省哲学社会科学规划项目(2022YB078);甘肃省高等学校产业支撑项目(2024CYZC-38);兰州财经大学首批学科科研融合团队建设项目(XKKYRHTD202302);兰州财经大学2026年度校级重点科研项目(Lzufe2026B-006)。

作者简介:张永凯(1974—),男,甘肃庆阳人,教授,博士,主要从事资源利用与区域发展研究。E-mail: Yongkai197497@163.com

通信作者:高明敏(E-mail: 2748723576@qq.com)

产业集聚对绿色效率具有显著非线性影响，呈现U型、倒U型或门槛效应等特征[7-10]，表明产业集聚的绿色效应并非固定不变，而是取决于外部约束条件与产业组织形态的共同作用；胡琰欣等[11]、陈勇等[12]证实数字产业集聚的创新与空间溢出效应，刘岩等[13]则发现黄河流域生产性服务业集聚同样具备正向空间溢出特征。第三，基于水资源约束视角，相关研究逐步向多系统耦合协调、工业水资源效率、空间格局演化与异质性分析延伸[14-17]。现有成果显示，产业发展是驱动黄河流域水资源承载力与高质量发展耦合协调的重要因素[18]，产业结构生态化也是解释黄河流域绿色转型空间差异的重要视角[19]。孟望生等[20]将水循环纳入研究框架，进一步完善了水资源约束下产业集聚影响绿色发展的分析体系。此外，既有研究还将环境规制[21-22]、协同创新[23-24]等因素纳入分析框架，分析其在影响产业集聚绿色效应、提升GTFP中的协同作用，进一步拓宽了研究视角。

虽然现有研究为产业集聚与绿色全要素生产率关系分析提供了有益参考，但仍存在以下提升空间：一是产业集聚绿色效应存在U型、倒U型等不同结论，说明其作用方向具有较强条件依赖性，而多数文献仍将水资源作为一般投入要素或外部约束进行处理，较少以水资源约束为核心门槛变量揭示其对产业集聚—GTFP关系的非线性调节作用；二是相关研究多聚焦单一产业类型，尚未充分将制造业集聚、生产性服务业集聚及其协同集聚纳入统一框架开展系统比较；三是针对黄河流域水资源约束的门槛效应研究不足，相关结论的流域适用性有待检验。因此，本文基于2006—2022年黄河流域81个地级市的面板数据，采用包含非期望产出的超效率SBM模型测度GTFP，并结合核密度估计、空间马尔科夫链和面板门槛模型，考察黄河流域GTFP时空演化特征及水资源约束下产业集聚的非线性影响。

1 数据与方法

1.1 研究对象与数据来源

以黄河流经的青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东8个省区中的81个地级及以上城市为研究对象。考虑到黄河流经四川省地域范围较小，在既有研究和区域经济联系中多被纳入长江经济带，本文未将四川省纳入样本范围。数据主要来源于历年《中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》以及各城市历年统计年鉴和国民经济和社会发展统计公报。对少量缺失数据，采用线性插值法或相邻年份均值法补齐。

1.2 研究方法

1.2.1 基于非期望产出的超效率SBM模型

本文采用包含非期望产出的超效率SBM模型测度GTFP。与传统DEA模型相比，SBM模型能够处理投入和产出的松弛问题，超效率形式则可进一步区分有效决策单元之间的效率差异。模型构建如式：

$$GTFP=\min\frac{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(\bar{x}/x_{ik})}{\frac{1}{r_1+r_2}\left(\sum_{s=1}^{r_1}(\bar{y}^d/y^d_{sk})+\sum_{q=1}^{r_2}(\bar{y}^u/y^u_{qk})\right)} \tag{1}$$

$$\begin{cases}\bar{x}\geqslant\sum\limits_{j=1;\neq k}^{n}x_{ij}\lambda_j;\ \bar{y}^d\leqslant\sum\limits_{j=1;\neq k}^{n}y^d_{sj}\lambda_j;\ \bar{y}^d\geqslant\sum\limits_{j=1;\neq k}^{n}y^d_{qj}\lambda_j;\\ \bar{x}\geqslant x_k;\ \bar{y}^d\leqslant y^d_k;\ \bar{y}^u\geqslant y^u_k\\ \lambda_j\geqslant 0, i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n\\ s=1,2,\cdots,r_1;\ q=1,2,\cdots,r_2\end{cases} \tag{2}$$

式中：假设有n个DMU，每个DMU由投入m、期望产出r_1和非期望产出r_2构成。x、y^d、y^u为相应矩阵中的元素；x_{ik}、y^d_{sk}、y^u_{qj}分别为投入、期望产出、非期望产出的观测值。GTFP为城市绿色全要素生产率测度值。

按照低效率（0~0.5）、中低效率（0.5~0.75）、较高效率（0.75~1）和高效率（≥1.0），对GTFP进行程度划分。

1.2.2 核密度估计

核密度估计是一种基于考察对象测度值分布特点的空间分析方法，核密度曲线分布的位置反映绿色发展绩效的数值，波峰的高度和宽度反映绿色发展绩效的聚集和分散程度，波峰数量反映极化程度：

$$f(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{x_i-x}{h}\right) \tag{3}$$

式中：$f(x)$为核密度估计量；n表示观测值个数；h为带宽，带宽越小核密度估计越精确；x_i为独立同分布

观测值；$K(\cdot)$为核密度函数，本文采用高斯核函数进行空间Kernel密度估计。

1.2.3　空间马尔科夫链

空间马尔科夫链是基于传统马尔科夫链而考虑空间滞后的因素构建的模型，可以更好地分析绿色全要素生产率类型在变化过程中与邻近地区间的相互作用关系，刻画空间溢出效应。

传统马尔可夫链的$K\times K$阶转移概率矩阵的核心计算公式为：

$$P_{ij}=\frac{n_{ij}}{n_i} \tag{4}$$

式中：P_{ij}为从状态i转移到状态j的概率；n_{ij}为整个研究期内发生此类转移的样本数；n_i为初始状态i的样本总数。然而，该模型忽略了地理单元间的空间交互。为捕捉空间溢出效应，空间马尔科夫链将“空间滞后类型”作为条件，构建条件转移概率矩阵：

$$P_{ij}(k)=\frac{n_{ij}(k)}{n_i(k)} \tag{5}$$

式中：$P_{ij}(k)$表示在给定其空间滞后类型为k(k=1，2，…，K)的条件下地区从状态i转移到状态j的概率；$n_{ij}(k)$与$n_i(k)$分别为满足该空间条件的相应转移样本数与初始样本数。

1.2.4　面板门槛回归模型

为检验产业集聚水平对绿色发展的影响是否存在非线性特征，以及这种影响是否受到水资源约束调节，本文采用Hansen[25]提出的面板门槛回归模型进行实证分析：

$$Y_{it}=\lambda_0+\lambda_1 X_{it}I_1(WRCI\leqslant\alpha)+\lambda_2 X_{it}I_2(WRCI>\alpha)+\gamma_i C_{it}+\mu_i+\varepsilon_{it} \tag{6}$$

式中：$WRCI$为门槛变量，即水资源约束指数；λ_0为常数项；λ_1、λ_2、γ_i为各变量系数；I_1和I_2分别表示门槛变量处于不同门槛区间时的表达函数，其余同上。

1.3　变量测度与说明

（1）被解释变量：绿色全要素生产率（GTFP）。在投入方面，选取劳动、资本和能源3种生产要素。劳动采用城市全社会从业人员数量数据；资本投入选取城市固定资产投资总额，并采用地级市所在区域的固定资产价格指数逐年平减到2006年基准价格；能源选取能源消耗总量数据。在产出方面，选取各城市地区生产总值为期望产出；选取城市工业废水、工业二氧化硫为非期望产出。

（2）核心解释变量：生产性服务业集聚、制造业集聚及生产性服务业与制造业的协同集聚指数。生产性服务业分类标准参照2019年国家统计局发布的《生产性服务业统计分类（2019）》。其中，生产性服务业集聚和制造业集聚选择区位熵指标来测度，产业协同集聚借鉴陈建军等[26]的方法来计算：

$$Coagg_{it}=\left(1-\frac{\left|LQ_man_{it}-LQ_ser_{it}\right|}{LQ_man_{it}+LQ_ser_{it}}\right)\times\left(LQ_man_{it}+LQ_ser_{it}\right) \tag{7}$$

该指数综合考虑了两类产业集聚水平的相对均衡性与整体集聚强度，值越大表示协同集聚程度越高。

（3）门槛变量：水资源约束指数（$WRCI$）。考虑到黄河流域水资源短缺、时空分布不均与产业用水强度较高等现实特征，单一用水指标难以全面反映城市面临的水资源约束程度。借鉴水资源承载力和资源环境约束相关研究，从用水压力、用水效率和资源禀赋3个方面构建水资源约束评价指标体系。其中，用水总量反映经济社会活动对水资源的总体需求，万元地区生产总值水耗反映单位经济产出所对应的用水强度，人均水资源量则反映地区水资源的基础禀赋。指标方向上，用水总量和万元地区生产总值水耗越高，表明水资源压力越大，属于正向指标；人均水资源量越高，说明水资源相对充裕，约束程度越弱，属于负向指标（表1）。为消除多源数据量纲差异对综合评价效果的干扰，首先对原始数据进行标准化处理，将量纲统一至[0，1]区间。然后用熵值法确定各维度指标的客观权重，进而运用线性加权综合模型来构建黄河流域水资源约束指数。

进行无量纲化处理：

$$x'_{tij}=\frac{x_{tij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{8}$$

$$x'_{tij}=\frac{\max(x_j)-x_{tij}}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{9}$$

式中：x_{tij}为第t年城市i的第j个指标值；$\max(x_j)$和$\min(x_j)$分别为该指标在所有年份和城市中的最大值和最小值。

计算权重：

$$p_{tij}=\frac{x'_{tij}}{\sum_{t=1}^{r}\sum_{i=1}^{m}x'_{tij}} \tag{10}$$

表 1 变量测度与说明

Table 1 Variable measurement and description

变量类别	一级指标	二级指标/测度方式	指标属性	权重/说明及依据
被解释变量	GTFP投入	劳动:全社会从业人员数量;资本:固定资产投资总额;能源:能源消耗总量	投入项	依据绿色生产函数,反映劳动、资本、能源三类基本投入
	GTFP产出	期望产出:地区生产总值;非期望产出:工业废水、工业SO_2	产出项	兼顾经济产出与环境污染,适用于黄河流域工业污染与水环境压力并存情境
核心解释变量	制造业集聚	制造业区位熵(*Magg*)	正向	衡量城市制造业相对专业化程度,反映产业规模集聚
	生产性服务业集聚	生产性服务业区位熵(*Sagg*)	正向	反映绿色服务嵌入和知识溢出能力
	产业协同集聚	协同集聚指数(*CoAgg*)	正向	兼顾两类产业集聚强度与均衡性,反映空间邻近向功能协同转化程度
门槛变量	用水压力	用水总量	正向	权重0.253,反映经济社会活动对水资源的绝对需求规模
	用水效率	万元地区生产总值水耗	正向	权重0.412,反映单位经济产出的耗水强度,权重最高说明效率差异是约束差异主要来源
	资源禀赋	人均水资源量	负向	权重0.335;反映天然水资源丰裕程度,数值越低表示约束越强
控制变量	经济水平	人均地区生产总值	控制项	控制城市经济发展阶段和资本积累差异
	科技创新	专利授权数	控制项	控制技术创新产出及其对绿色效率的影响
	产业结构	第二、三产业增加值占地区生产总值比重	控制项	控制资源型工业和服务业扩张的结构性影响
	对外开放	实际利用外资金额	控制项	控制外部资本、技术和产业转移影响

$$e_j = -\frac{1}{\ln(r \times m)} \sum_{t=1}^{r} \sum_{i=1}^{m} [\, p_{tij} \times \ln(p_{tij}) \,] \quad (11)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (12)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \quad (13)$$

式中:p_{tij}表示第t年城市i的第j个指标占该指标综合的比重;e_j表示第j项指标的熵值;d_j为第j项指标的差异系数,d_j越大,表示该指标的重要性越高;w_j为第j项指标的权重。

计算水资源约束综合指数$WRCI_{ti}$:

$$WRCI_{ti} = \sum_{j=1}^{n} (w_j \times x'_{tij}) \quad (14)$$

该指数值越大,表明该城市面临的水资源约束越强。

(4) 控制变量:借鉴已有研究,将经济水平(*gdp*)、科技创新(*teci*)、产业结构(*inds*)及对外开放(*fdi*)指标作为控制变量,分别以人均地区生产总值、专利授权数、第二产业增加值占地区生产总值比重、第三产业增加值占地区生产总值比重和实际利用外资金额表征。

2 结果与分析

2.1 时间演化特征

整体上看,黄河流域GTFP呈上升趋势,但不同区域、不同城市之间提升并不均衡。全流域核密度曲线主峰主要集中在0.30~0.45,说明多数城市仍处于中低效率水平;到2022年,低效率区间的集中程度有所下降,高效率区间的分布更加明显,说明部分城市绿色效率提升较快,开始进入较高效率水平,但仍有较多城市停留在较低效率区间,流域内部差异有所扩大(图1)。

分区域看,上游地区主峰长期集中在0.25~0.40,曲线变化较小,表明其GTFP虽有改善,但整体提升速度较慢,仍处于追赶阶段;中游地区曲线波动较明显,2013年主峰位于0.35附近,2013年以后高效率区间的分布有所增加,说明中游内部城市分化增强,部分城市提升较快,但有城市仍处于较低水平;下游地区高效率区间分布最为明显,说明高效率城市相对集中,绿色转型水平总体领先。总体而言,2006—2022年黄河流域GTFP整体改善,但区

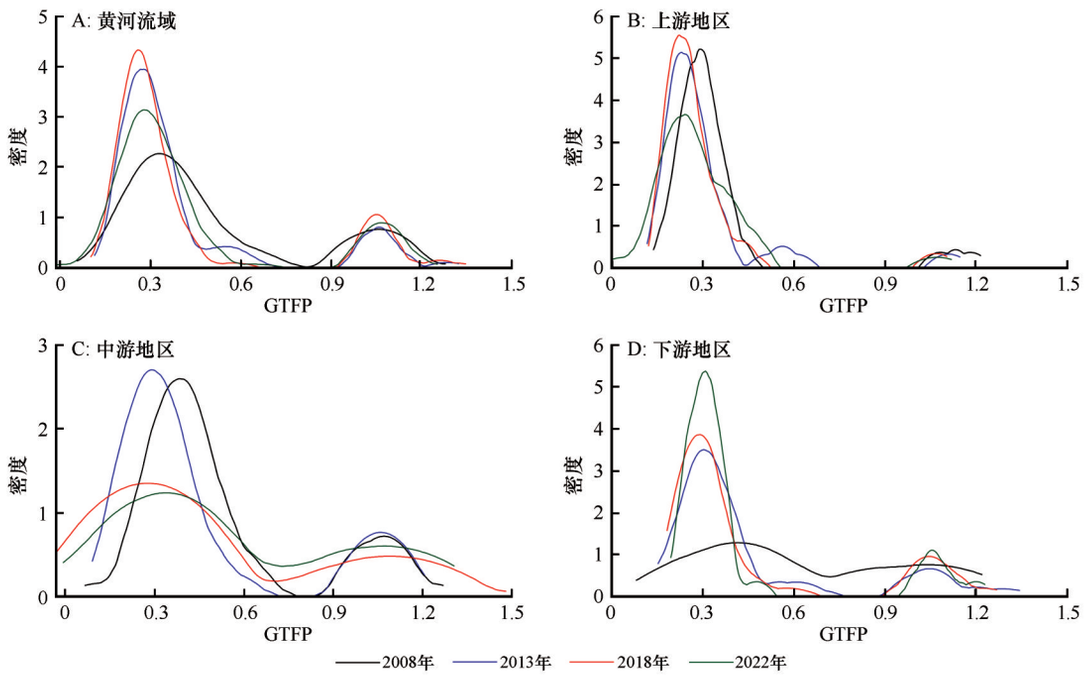


图 1　GTFP 的分布核密度

Fig.1　Kernel density distribution of GTFP

域差异仍然存在，并逐步形成下游领先、中游分化、上游追赶的梯度格局。

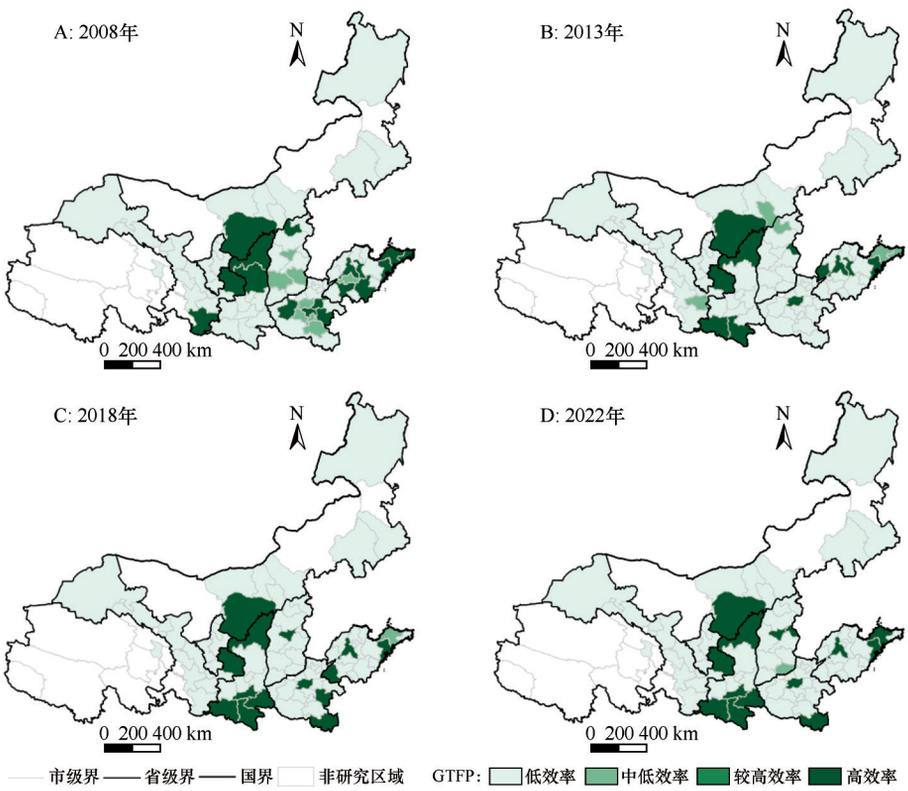
2.2　空间分布特征

2008 年，高效率城市主要集中在山东半岛及河南中部，低效率和中低效率城市多分布于上游地区，空间上表现为东高西低、南高北低。2013 年以后，高效率区域由山东半岛向河南中部进一步集聚，郑州、西安等中游节点城市效率提升，带动中部地区向中高效率过渡，但青海东部、甘肃中西部和内蒙古西部仍以低效率为主。2018 年，高效率区域继续向中游延伸，河南中部、山西南部和陕西关中地区逐步形成中高效率集聚带，宁夏沿黄城市、兰州等上游节点城市虽有所改善，但整体仍弱于中下游。到 2022 年，山东半岛、河南大部分城市及关中平原高效率格局趋于稳定，而内蒙古西部、甘肃河西走廊和青海东部仍存在零散低效率区域，尚未形成连片改善（图 2）。

这一演化过程表明，黄河流域 GTFP 高效率区随时间扩张，但区域差异并未同步收敛，绿色转型仍具有明显的空间不均衡和阶段性特征。其形成既受自然条件、资源禀赋和产业结构影响，也与绿色发展政策落实、技术创新能力和环境治理投入差异有关。因而，下游地区应巩固绿色技术和结构升级优势，中游地区应强化区域协同与产业绿色转型，上游地区则需重点突破资源依赖和生态约束，推动低效率区域系统性改善。

2.3　空间演化特征

由表 2 可见，黄河流域 GTFP 演化具有三方面特征。第一，路径依赖明显。多数条件矩阵中对角线概率高于非对角线概率，说明城市在相邻时期保持原有效率等级的概率较高。例如，在低效率邻域条件下，低效率城市 2006—2022 年保持低效率的概率为 1.000，表明上游资源型和生态脆弱地区一旦形成低效率锁定，短期内难以自发跃迁。第二，存在俱乐部趋同。低效率城市和高效率城市均表现出较强稳定性，低效率俱乐部主要与水资源稀缺、能源重化工锁定和绿色技术扩散不足有关；高效率俱乐部则多出现在山东半岛、河南中部和关中平原等产业基础较好、市场联系较强的区域，说明产业基础和创新服务网络会强化高效率集聚（图 3）。第三，空间溢出具有非对称性。邻域为中高或高效率类型时，并非所有低效率城市都能顺利上升；而邻域为低效率类型时，本地向上转移概率明显受限。这说明高效率地区的正向外溢需要交通联系、产业链配套、技术平台和节水制度共同支撑，而低效率邻域的同质化竞争、资源依赖和高耗水产业扩张更容易形成负向锁定。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作，底图边界无修改。

图2 黄河流域城市GTFP空间分布格局

Fig.2 Spatial distribution pattern of GTFP in cities of the Yellow River Basin

总之，黄河流域城市GTFP的空间演化并非随机波动，而是呈现原有等级惯性—邻域条件约束—区域俱乐部分化的复合过程。这与黄河流域产业基础和水资源禀赋高度相关：下游城市依托较完善的制造业分工、生产性服务业网络和节水治理能力，更容易吸收邻近高效率城市的知识溢出；中游城市处于承接产业转移和资源型产业转型并存阶段，效率跃迁方向受邻域环境影响更强；上游城市受生态脆弱、水资源短缺和产业链配套不足影响，即便邻近高效率城市，也可能因吸收能力不足而难以实现显著跃升。因而，政策上既要强化高效率城市的绿色技术扩散，又要针对低效率连片地区建立跨市协同治理和产业准入约束，避免低效率状态在空间上持续复制。

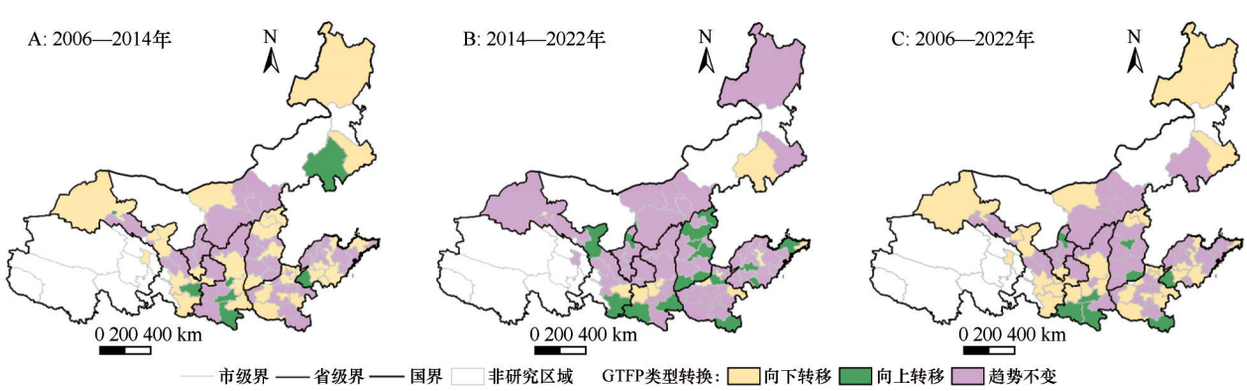
2.4 空间分异格局的形成原因

黄河流域GTFP下游领先、中游分化、上游追赶的梯度格局并非随机形成，而是区域资源禀赋、产业发展阶段与政策倾斜力度共同作用的结果。首先，水资源禀赋及其约束强度决定了绿色转型的初始条件。下游山东、河南等地区经济基础较好，水资源约束处于相对适中区间，资源压力能够通过价格、规制和节水技术投资形成倒逼创新效应；而上游甘肃、宁夏、内蒙古西部等地生态脆弱、水资源稀缺，过强约束更容易转化为成本压制，削弱企业绿色技术投入能力。其次，产业结构差异强化了效率分化。下游制造业与生产性服务业联系较为紧密，技术咨询、金融服务、物流组织和研发外包等生产性服务能够降低制造业绿色转型成本；中上游资源型城市则长期依赖能源重化工产业，产业锁定和高耗水生产惯性使GTFP提升更为缓慢。再次，空间溢出具有明显非对称性。已有关于黄河流域生产性服务业集聚与GTFP的研究指出，服务业集聚存在正向空间外溢，但这种外溢需要以市场联系、交通网络和创新平台为载体。对于城市联系较弱、产业链配套不足的上游地区，高效率区域的技术扩散难以充分传导，低效率邻域反而可能通过同质化竞争和资源依赖形成锁定。最后，水资源承载力与高质量发展的耦合协调程度也是重要背景。当产业协同集聚未能同步实现节水技术共享和绿色服务嵌入时，两类产业会在有限水资源下由互补关系转向竞争关系，导致协同集聚未必带来绿色效率提升。

表 2　黄河流域城市 GTFP 空间马尔科夫转移矩阵

Table 2　Spatial Markov Transition Matrix of GTFP of cities in the Yellow River Basin

相邻类型	本市类型	2006—2014 年				2014—2022 年				2006—2022 年			
		低效率	中低效率	中高效率	高效率	低效率	中低效率	中高效率	高效率	低效率	中低效率	中高效率	高效率
低效率	低效率	0.3333	0.6667	0.0000	0.0000	0.7500	0.2500	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	中低效率	0.2500	0.5000	0.2500	0.0000	0.4286	0.4286	0.1429	0.0000	0.3750	0.2500	0.2500	0.1250
	中高效率	0.1429	0.1429	0.7143	0.0000	0.1250	0.2500	0.5000	0.1250	0.1429	0.4286	0.4286	0.0000
	高效率	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.3333	0.0000	0.6667
中低效率	低效率	0.4286	0.1429	0.1429	0.2857	0.3333	0.6667	0.0000	0.0000	0.2857	0.2857	0.2857	0.1429
	中低效率	0.4000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	0.2000	0.2000	0.0000	0.6000
	中高效率	0.0000	0.3333	0.3333	0.3333	0.2500	0.0000	0.2500	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
	高效率	0.2000	0.0000	0.2000	0.6000	0.1429	0.0000	0.4286	0.4286	0.0000	0.2000	0.4000	0.4000
中高效率	低效率	0.4286	0.4286	0.0000	0.1429	0.2500	0.5000	0.2500	0.0000	0.5714	0.2857	0.1429	0.0000
	中低效率	0.0000	0.6667	0.3333	0.0000	0.1429	0.2857	0.4286	0.1429	0.0000	0.6667	0.3333	0.0000
	中高效率	0.0000	0.4000	0.4000	0.2000	0.3333	0.6667	0.0000	0.0000	0.2000	0.4000	0.2000	0.2000
	高效率	0.0000	0.2000	0.0000	0.8000	0.0000	0.0000	0.3333	0.6667	0.0000	0.0000	0.4000	0.6000
高效率	低效率	0.7500	0.0000	0.2500	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7500	0.2500	0.0000	0.0000
	中低效率	0.6667	0.0000	0.3333	0.0000	0.3333	0.6667	0.0000	0.0000	0.6667	0.0000	0.0000	0.3333
	中高效率	0.0000	0.1667	0.6667	0.1667	0.0000	0.3333	0.3333	0.3333	0.0000	0.3333	0.5000	0.1667
	高效率	0.2857	0.1429	0.0000	0.5714	0.0000	0.0000	0.2000	0.8000	0.1429	0.1429	0.2857	0.4286



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号标准地图制作，底图边界无修改。

图 3　2006—2022 年黄河流域 GTFP 类型转移空间分布

Fig.3　Spatial distribution of GTFP type transfers in the Yellow River Basin from 2006 to 2022

2.5　水资源约束下产业集聚影响 GTFP 的门槛效应

本文基于面板门槛回归方法，以水资源约束指数为门槛变量，检验制造业集聚、生产性服务业集聚和产业协同集聚对 GTFP 的阶段性影响。水资源约束在各类产业集聚影响 GTFP 过程中均具有显著门槛作用。制造业集聚对 GTFP 的影响具有明显的倒 U 型特征（表 3）。当 *WRCI* 低于 1.215 时，制造业集聚系数为−0.005 且不显著，表明水资源约束较弱时，制造业扩张更多表现为规模集聚，节水减排和技术改造动力不足，绿色效率改善并不明显。当 *WRCI* 在 1.215~1.565 时，系数升至 0.164 并在 1% 水平上显著，说明适度约束能够强化水资源稀缺信号，推动企业通过节水改造、工艺优化和落后产能退出释放倒逼创新效应。当 *WRCI* 超过 1.565 后，系数转为−0.118，表明过强约束会推高取用水和污染

表 3 门槛效应估计结果

Table 3 Estimation results of the threshold effect

模型	变量/门槛区间	系数（*t* 值）	*P* 值
制造业集聚	*Magg*×*I*(*WRCI*<1.215)	−0.005(−0.469)	0.639
	Magg×*I*(1.215≤*WRCI*<1.565)	0.164***(3.147)	0.002
	Magg×*I*(*WRCI*≥1.565)	−0.118*(−1.731)	0.084
	人均地区生产总值（元）	0.000(0.819)	0.413
	第二产业增加值占地区生产总值比重（%）	−0.004***(−3.063)	0.002
	第三产业增加值占地区生产总值比重（%）	−0.007***(−4.582)	0.000
	专利授权数（件）	0.000(1.366)	0.172
	实际利用外资金额（亿元）	0.000(1.045)	0.296
生产性服务业集聚	*Sagg*×*I*(*WRCI*<0.757)	0.139***(8.127)	0.000
	Sagg×*I*(0.757≤*WRCI*<1.565)	0.086***(4.444)	0.000
	Sagg×*I*(*WRCI*≥1.565)	−0.007(−0.369)	0.712
	人均地区生产总值（元）	0.000*(1.863)	0.062
	第二产业增加值占地区生产总值比重（%）	−0.005***(−4.269)	0.000
	第三产业增加值占地区生产总值比重（%）	−0.010***(−6.503)	0.000
	专利授权数（件）	0.000*(1.727)	0.084
	实际利用外资金额（亿元）	0.000(1.487)	0.137
产业协同集聚	*CoAgg*×*I*(*WRCI*<0.795)	0.002(0.045)	0.964
	CoAgg×*I*(0.795≤*WRCI*<1.565)	−0.104**(−2.383)	0.017
	CoAgg×*I*(*WRCI*≥1.565)	−0.267***(−5.225)	0.000
	人均地区生产总值（元）	0.000*(1.647)	0.099
	第二产业增加值占地区生产总值比重（%）	−0.005***(−3.499)	0.000
	第三产业增加值占地区生产总值比重（%）	−0.008***(−5.155)	0.000
	专利授权数（件）	0.000(1.421)	0.155
	实际利用外资金额（亿元）	0.000(0.815)	0.415

注：括号内为 *t* 值；***、**和*分别表示在 1%、5% 和 10% 的水平上显著；*WRCI* 为水资源约束指数，*Magg*、*Sagg* 和 *CoAgg* 分别表示制造业集聚、生产性服务业集聚和产业协同集聚。控制变量包括人均地区生产总值、第二产业增加值占地区生产总值比重、第三产业增加值占地区生产总值比重、专利授权数和实际利用外资金额。

治理成本，挤压研发与设备更新投入，成本压制效应开始超过倒逼创新效应。生产性服务业集聚则表现为递减促进效应。在低约束区间，系数为 0.139 且显著，研发设计、信息服务、金融服务和环保咨询等服务功能能够较好嵌入制造业绿色转型；进入中等约束区间后，促进作用有所减弱；在高约束区间，系数降为−0.007 且不显著，说明水资源约束过强时，制造业对高端服务的有效需求下降，服务业自身运营成本上升，知识溢出和技术扩散链条也随之受阻。产业协同集聚的结果则显示出约束增强型抑制特征：低约束区间影响不显著，中高约束区间系数分别为−0.104 和−0.267，且均显著为负。这表明黄河流域部分城市的制造业与生产性服务业虽然在空间上邻近，但尚未形成稳定的功能协同关系；在水资源短缺背景下，二者反而可能因用水竞争、产业锁定和绿色服务嵌入不足而造成效率损失。

控制变量结果进一步揭示了黄河流域绿色转型的结构性制约。第二、三产业比重显著为负，表明产业结构高级化并未必然转化为绿色效率提升，资源型工业、传统服务业及高耗水环节仍可能对 GTFP 形成抑制。人均地区生产总值系数整体较小，仅在部分模型中呈弱显著，说明经济发展水平

对GTFP的影响并不稳定。专利授权数影响有限，反映出创新成果向绿色生产绩效转化仍存在一定滞后，部分技术供给与节水工艺、清洁生产和污染治理需求之间尚未形成有效匹配。实际利用外资影响不显著，可能与流域外资规模相对有限、投向偏重能源化工和装备制造等资本密集型行业有关，其绿色技术溢出效应尚未充分释放。总体来看，产业集聚对GTFP的影响并非由集聚规模单独决定，而取决于水资源约束强度、产业功能结构与区域转型基础之间的匹配程度。

2.6　稳健性检验

为避免不同计算方式衡量解释变量和被解释变量造成实证结果的不稳健性，采用以下方式进行稳健性检验。第一，对GTFP、产业集聚变量和水资源约束指数进行1%双侧缩尾处理，以降低极端值影响。各产业集聚变量在不同水资源约束区间内的系数方向、显著性和非线性变化趋势与基准回归基本一致。第二，以万元地区生产总值水耗替代综合水资源约束指数作为门槛变量。尽管新指标的量纲和分布不同，导致具体门槛值和系数大小有所变化，但模型仍识别出显著门槛区间，且产业集聚影响GTFP的方向和阶段性特征未发生实质改变。第三，替换被解释变量测度方式，仅以工业二氧化硫作为非期望产出，重新测算绿色全要素生产率，并进行面板门槛回归。结果表明，制造业集聚、生产性服务业集聚和产业协同集聚的核心结论仍然成立（表4）。总体来看，基准结果并不依赖于极端值处理、门槛变量选取或GTFP测度方式，具有较好的稳健性。

3　讨论

本文基于2006—2022年81个城市的面板数据，考察了黄河流域GTFP的时空演化特征，并以水资源约束为门槛变量，检验产业集聚影响GTFP的非线性作用。结果表明，黄河流域GTFP呈现下游领先、中游分化、上游追赶的空间格局，并具有路径依赖和俱乐部趋同特征，说明流域绿色发展差异并非短期波动，而是资源禀赋、产业基础、技术扩散能力和政策执行差异共同作用的结果。与单纯从经济发展水平或产业结构解释GTFP差异相比，本文进一步强调水资源约束的门槛作用，有助于解释相同产业集聚在不同地区产生差异化绿色效率结果的原因。

从门槛回归结果看，制造业集聚对GTFP呈倒U型影响。适度水资源约束能够通过节水改造、清洁生产和工艺升级形成倒逼创新效应，但过强约束会推高生产和治理成本，压缩企业技术改造空间。生产性服务业集聚的促进作用随约束增强而递减，表明其绿色赋能依赖稳定的制造业需求和服务嵌入条件；当水资源约束持续增强时，服务供给、产业协作和知识扩散效率可能下降。产业协同集聚在高约束区间转为显著抑制，说明制造业与生产性服务业的空间邻近并不必然形成有效协同。若缺乏用水协调、产业分工和绿色技术嵌入机制，协同集聚在水资源承载压力较大的地区可能演化为资源竞争和效率损失。

然而，本文仍存在一定不足。第一，受城市统计数据可得性限制，研究期截至2022年，尚未纳入后续年份数据。未来可将黄河流域跨省区用水权交易改革、南水北调后续工程和区域水资源调配等政策纳入准自然实验框架，进一步识别水权市场化改革和跨流域调水对产业集聚绿色效应的影响。第二，本文主要在地级市层面测度产业集聚和水资源约束，难以揭示不同行业和企业类型之间的微观差异。第三，产业协同集聚仍以总体指标衡量，尚未区分节水技术服务、绿色金融、环保咨询、工业互联网和供应链管理等生产性服务业门类的具体作用，后续可结合细分数据进一步拓展。

4　结论

黄河流域城市GTFP整体呈上升趋势，但区域差异明显，形成下游领先、中游分化、上游追赶的梯度格局。高效率区主要在下游和关中平原连片扩张，低效率区则较多分布于上游地区。因此，黄河流域应实行分区分类的绿色效率提升策略。下游地区应依托较好的产业基础、市场条件和技术服务能力，发挥绿色制造、节水治理和环境管理经验的示范作用；中游地区应结合资源型产业和老工业城市转型需求，推动传统产业降耗减排和绿色化改造；上游地区则应更多地立足水资源承载能力和生态保护要求，控制高耗水、高排放产业扩张，培育节水型和生态友好型产业。

黄河流域GTFP演化具有路径依赖、俱乐部趋同和邻域影响特征。高效率邻域对本地绿色效率提升具有潜在带动作用，但其效果取决于产业承接

表 4 稳健性检验结果

Table 4 Results of robustness test

被解释变量	门槛变量	解释变量	门槛区间划分	弹性系数	*t* 值	*P* 值
GTFP	水资源约束1%的缩尾	制造业集聚缩尾	*WRCI*<1.215	−0.005	−0.414	0.679
			1.215≤*WRCI*<1.565	0.164***	3.162	0.002
			WRCI≥1.565	−0.118*	−1.724	0.085
		生产性服务业缩尾	*WRCI*<0.757	0.14***	8.125	0.000
			0.757≤*WRCI*<1.565	0.091***	4.585	0.000
			WRCI≥1.565	−0.006	−0.29	0.772
		协同集聚缩尾	*WRCI*<0.795	0.001	0.028	0.978
			0.795≤*WRCI*<1.565	−0.104**	−2.393	0.017
			WRCI≥1.565	−0.266***	−5.218	0.000
GTFP	万元地区生产总值水耗	制造业集聚	*WRCI*<0.004	0.14***	4.896	0.000
			0.004≤*WRCI*<0.029	−0.015	−1.382	0.167
			WRCI≥0.029	−0.086***	−3.881	0.000
		协同集聚	*WRCI*<0.004	0.098**	2.091	0.037
			0.004≤*WRCI*<0.017	−0.091**	−2.268	0.023
			WRCI≥0.017	−0.263***	−5.039	0.000
		生产性服务业集聚	*WRCI*<0.003	0.333***	4.413	0.000
			0.003≤*WRCI*<0.011	0.129***	5.877	0.000
			WRCI≥0.011	0.049***	3.029	0.002
GTFP_SO_2	水资源约束指数	制造业集聚	*WRCI*<0.341	0.086***	5.68	0.000
			0.341≤*WRCI*<0.936	0.037***	3.204	0.001
			WRCI≥0.936	0.095***	4.241	0.000
		生产性服务业集聚	*WRCI*<0.910	−0.013	−1.408	0.159
			0.910≤*WRCI*<1.633	0.071***	4.172	0.000
			WRCI≥1.633	−0.024*	−1.709	0.087
		产业协同集聚	*WRCI*<0.641	0.098***	3.32	0.001
			0.641≤*WRCI*<0.910	0.05*	1.781	0.075
			WRCI≥0.910	0.119***	4.034	0.000

注：***、**和*分别表示在1%、5%和10%水平下显著；*P*值为0时统一记为0.000；GTFP_SO_2表示以工业二氧化硫为单一非期望产出重新测算的绿色全要素生产率。

能力、技术扩散条件和治理协同水平；低效率邻域则更容易通过资源依赖、同质化竞争和高耗水产业延续强化低效锁定。因而，治理重点应由单个城市提升转向流域协同。一方面，应发挥高效率城市在节水减排技术、环境治理经验和产业链配套方面的外溢作用，推动绿色技术和管理经验向中上游地区延伸；另一方面，应针对长期处于低效率等级的城市建立重点提升清单，围绕节水技改、工业废水循环利用、清洁生产审核和绿色项目准入开展持续治理，避免低效率状态在空间上固化。

水资源约束对产业集聚影响GTFP具有显著门槛效应，应结合不同产业集聚类型的门槛结果实行分等级管控。低约束地区应重点防止水资源成本较低带来的粗放扩张倾向，要将用水强度、污染排放和节水水平作为产业集聚质量评价的重要内容，避免高耗水项目过度集聚。中度约束地区则应将水资源压力转化为绿色创新动力，引导制造业通过节水改造、设备更新和清洁生产提高绿色效率，同

时促进研发设计、环保咨询、绿色金融等生产性服务更好融入制造业绿色转型。高约束地区应把水资源承载能力作为产业布局的刚性约束，严控高耗水、高排放产业的新增规模，通过用水权配置、跨区域水资源调配和再生水利用缓解产业间水资源竞争。

参考文献：

[1] Li Y，Ni L，Chen W，et al.Forestry green development efficiency in China's Yellow River Basin：evidence from the Super-SBM model and the global Malmquist-Luenberger index[J]. Land，2026，15(1)：147.

[2] 时朋飞，王梦君，张鸿浩，等.黄河流域城市绿色发展效率的分异特征与数字经济的驱动效应[J].经济地理，2025，45(7)：85-94.

[3] Fu L，Zhang S，Guo S.A study on the changes of green total factor productivity in Chinese cities under resource and environmental constraints[J].Sustainability，2024，16(4)：1658.

[4] Cheng Z，Li X，Zhu Y，et al.The effects of agglomeration externalities on urban green total-factor productivity in China[J]. Economic Systems，2023，47(2)：101025.

[5] 桂镜玄，毛熙彦，许翌琛，等.长三角地区节能环保产业集聚模式演变及其对绿色创新的影响[J].地理研究，2026，45(4)：938-956.

[6] Dong X，Chen Y，Zhuang Q，et al.Agglomeration of productive services，industrial structure upgrading and green total factor productivity：an empirical analysis based on 68 prefectural-level-and-above cities in the Yellow River Basin of China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health，2022，19(18)：11643.

[7] Ma J，Yu X.The U-shaped impact of manufacturing-services co-agglomeration on urban green efficiency：evidence from the Yangtze River Delta[J].Sustainability，2026，18(2)：967.

[8] Han Y，Wang X，Zhe C.The impact of economic agglomeration on green total factor productivity：an empirical analysis from China's Yellow River Basin[J].Polish Journal of Environmental Studies，2023，32(1)：61-77.

[9] 陈义忠，贺鹏明，张思思，等.水资源利用视角下绿色发展门槛效应及其空间异质性：以长江经济带三大城市群为例[J].水资源与水工程学报，2025，36(1)：105-117.

[10] 薛选登，张悦.生产集聚对农业用水绿色效率的作用机制研究：基于黄河流域面板数据的实证检验[J].水资源与水工程学报，2025，36(3)：182-188.

[11] 胡琰欣，李郇涛，舒海诚，等.数字产业集聚对城市绿色经济效率提升的影响及其空间溢出效应[J].中国人口·资源与环境，2026，36(2)：161-172.

[12] 陈勇，程钰，张悦，等.黄河流域数字经济产业集聚演化及其对绿色技术创新的影响[J].地理科学进展，2025，44(12)：2584-2599.

[13] 刘岩，程钰，王亚平.黄河流域生产性服务业集聚对城市绿色全要素生产率的影响效应与空间溢出[J].地理研究，2023，42(4)：917-935.

[14] 曾岚婷，陈毅辉，周小亮.数字化转型与绿色全要素生产率耦合协调的时空格局及分异机理研究[J].环境科学研究，2025，38(6)：1383-1396.

[15] 田培，韩昊廷，李佳，等.长江经济带水资源开发保护与绿色发展的耦合协调关系研究[J].长江流域资源与环境，2023，32(10)：2085-2097.

[16] 苗峻瑜.沿黄九省区工业水资源效率及其影响因素的时空异质性[J].中国沙漠，2022，42(6)：142-152.

[17] 罗万云，王福博，孙慧.黄河流域高质量绿色发展水平与空间格局演化特征[J].中国沙漠，2022，42(3)：11-20.

[18] 谢群，卢泽花，贠晓哲.黄河流域水资源承载力与高质量发展的耦合协调及其驱动机制研究[J].中国农业资源与区划，2025，46(4)：91-102.

[19] 张明斗，杨雨欣.黄河流域城市产业结构生态化的时空格局及影响因素[J].中国沙漠，2024，44(3)：108-118.

[20] 孟望生，刘玮霖，刘华桢.水循环视角下黄河流域城市包容性绿色发展效率测度与分析[J].干旱区地理，2025，48(10)：1841-1854.

[21] 邱士雷，王帆，陈祺，等.结构调整视角下环境规制对工业绿色全要素生产率的影响机制研究[J].干旱区资源与环境，2025，39(9)：1-12.

[22] Zheng Y，Zhou Z，Zhou F.The non-linear effect of dual environmental regulation on urban green total factor productivity：evidence from 284 cities in China[J]. Sustainability，2024，16(12)：4894.

[23] Lin B，Xie Y.Assessing the potential of collaborative innovation strategies to drive green development：threshold effect of market competition[J].Journal of Environmental Management，2024，370：122951.

[24] Gu R，Li C，Yang Y，et al.The impact of industrial digital transformation on green development efficiency considering the threshold effect of regional collaborative innovation：evidence from the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China[J].Journal of Cleaner Production，2023，420：138345.

[25] Hansen E B.Threshold effects in non-dynamic panels：estimation，testing，and inference[J].Journal of Econometrics，1999，93(2)：345-368.

[26] 陈建军，刘月，邹苗苗.产业协同集聚下的城市生产效率增进：基于融合创新与发展动力转换背景[J].浙江大学学报(人文社会科学版)，2016，46(3)：150-163.

The spatiotemporal evolution of green total factor productivity in the Yellow River Basin and the threshold effect of water resource constraints

Zhang Yongkai[ab], Gao Mingmin[a]

(a. *School of Agriculture and Forestry Economics and Management* / b. *Research Center for Resources, Environment and Urban-Rural Planning*, *Lanzhou University of Finance and Economics*, *Lanzhou* 730101, *China*)

Abstract: This study measures the green total factor productivity (GTFP) of 81 prefecture-level cities in the Yellow River Basin from 2006 to 2022 using a super-efficiency SBM model with undesirable outputs. Kernel density estimation, spatial Markov chains and panel threshold regressions are then used to examine the spatiotemporal evolution of GTFP and the green effects of industrial agglomeration under water resource constraints. The results show that GTFP in the Yellow River Basin generally increases, while a gradient pattern of downstream leadership, midstream differentiation and upstream catch-up has formed. The spatial Markov transition matrix further reveals path dependence, club convergence and asymmetric neighborhood effects. Threshold regressions indicate that water resource constraints significantly reshape the green effects of industrial agglomeration. Manufacturing agglomeration has an inverted U-shaped effect on GTFP and promotes GTFP only under moderate water constraints; the positive effect of producer service agglomeration weakens as constraints intensify; and manufacturing-service co-agglomeration turns into a significant negative effect in highly constrained areas. These findings suggest that green industrial transformation in the Yellow River Basin should not rely only on the expansion of agglomeration scale, but should integrate rigid water constraints, water-right allocation and functional industrial coordination into a unified policy framework.

Key words: green total factor productivity; spatiotemporal evolution; threshold effect; water resource constraints; Yellow River Basin