长江经济带沿江城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据集（2000−2022）研发

刘 荣[1,2]，王振波[1*]

1. 中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101；
2. 中国科学院大学，北京 100049

摘 要：作者构建了长江经济带 25 个沿江核心城市 2000−2022 年工业绿色全要素生产率（Green Total Factor Productivity，GTFP）数据集。该数据集基于方向距离函数与全局 Malmquist-Luenberger 指数（GML），采用三层递进测度体系实现环境约束效应的分离：基准全要素生产效率（TFP）不计入水环境变量，水约束（GTFP^{w}）纳入工业用水投入与水污染排放，水-能双约束（GTFP^{we}）再纳入能源投入。三层采用同一方向向量、同一全局生产技术与同一规模报酬设定，差异仅在投入产出变量集，故其累积指数之差可归因于变量集的变化。据此提供两个约束拖累指数：水环境拖累指数（Water Environment Drag Index，WEDI）量化水环境变量引入所致的增长轨迹偏离，能源消耗拖累指数（Energy Consumption Drag Index，ECDI）量化能源约束的附加效应。数据集包含 575 条记录（25 城市×23 年），涵盖 GTFP 及其分解指标（技术进步指数、技术效率指数）、累积生产率指数、WEDI、ECDI 共 6 个核心变量。测算结果显示：全流域 GTFP^{we} 年均增长 1.80%，技术进步是工业绿色转型的主导驱动力；WEDI 呈倒 U 型，2012 年达峰 0.074 后波动回落，三年滚动均值自 2018−2020 年窗口起转负，“绿色交叉”确立于 2020−2021 年之交，标志着水治理从“拖累期”进入“红利期”；城市异质性显著，2020−2022 年间 17 个城市 WEDI 转负，8 个城市仍为正值。数据集内容包括：（1）25 个城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据，包括：无约束、水约束、水-能双约束三种方式的全要素生产率，累积效率指数，水环境拖累指数和能源消耗拖累指数；（2）25 个城市的空间信息；（3）计算用到的投入产出数据。数据集存储为.xlsx 格式，由 1 个数据文件组成，数据量为 214 KB。该数据集支持了第一作者理学博士学位论文的完成。

关键词：工业绿色全要素生产率；长江经济带；全局 Malmquist-Luenberger 指数；水环境拖累指数；能源消耗拖累指数；理学博士学位论文

DOI: https://doi.org/10.3974/geodp.2026.05.03

CSTR: https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.05.03

收稿日期：2026-04-09；**修订日期**：2026-09-26；**出版日期**：2026-10-25

基金项目：国家自然科学基金（42171184）；中国科学院（XDA23100303）

***通讯作者**：王振波，中国科学院地理科学与资源研究所，wangzb@igsnrr.ac.cn

数据引用方式：[1] 刘荣，王振波. 长江经济带沿江城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据集(2000−2022)研发[J]. 全球变化数据学报，2026，10(5)：526–537. https://doi.org/10.3974/geodp.2026.05.03. https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.05.03.

[2] 刘荣，王振波. 长江经济带沿江城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据集(2000−2022)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志，2026. https://doi.org/10.3974/geodb.2026.04.08.V1. https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2026.04.08.V1.

数据可用性声明：
本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》出版，可获取：
https://doi.org/10.3974/geodb.2026.04.08.V1 或 https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2026.04.08.V1.

1　引言

工业绿色全要素生产率（Green Total Factor Productivity，GTFP）是测度工业绿色转型效率的核心指标，通过将资源消耗与污染排放纳入生产函数，能够区分“真实增长”与“环境透支”[1,2]。2016 年“共抓大保护、不搞大开发”战略实施以来，长江经济带沿江城市面临着日益趋严的环境约束，科学测度工业绿色转型效率已成为政策评估与路径优化的重要科学问题[3,4]。当前，学术界已形成多种 GTFP 测度方法，主要包括数据包络分析（Data Envelopment Analysis，DEA）和随机前沿分析（Stochastic Frontier Analysis，SFA）两大类[5–8]，并产出了一批区域或行业 GTFP 数据集。这些研究为理解工业绿色转型奠定了重要基础。

但从支撑长江经济带“共抓大保护”战略评估的角度审视，现有数据产品仍存在 3 方面局限。第一，约束效应识别不足。现有研究多将水污染、大气污染、碳排放等多种环境约束同时纳入单一模型[7,8]，测算出的 GTFP 是所有约束的综合效应，无法识别各类约束的独立贡献，从而难以回答“水污染约束对效率的拖累有多大？”“哪些城市已将水治理转化为效率红利？”等政策核心问题。第二，流域特征刻画不足。长江经济带是典型的“水环境敏感”流域，水污染治理是“共抓大保护”战略的首要任务，但现有数据集多以碳排放或大气污染物为主要非期望产出，缺少针对水污染约束的专门测度和指数化表征。第三，政策周期覆盖不完整。现有数据集多覆盖 2010 年后，无法刻画 2000 年以来完整的政策演化周期（从“十五”粗放扩张到“十一五”“十二五”节能降耗，再到“十三五”“十四五”共抓大保护），限制了对长期趋势、拐点及政策效应的识别。

为应对上述挑战，作者构建了长江经济带 25 个沿江核心城市 2000−2022 年工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据集[9]。该数据集基于方向距离函数与全局 Malmquist-Luenberger 指数，采用三层递进测度体系实现环境约束效应的分离：基准 TFP 不计入水环境变量，水约束 GTFP^{w} 纳入工业用水投入与水污染排放，水-能双约束 GTFP^{we} 再纳入能源投入。通过累积指数差分，数据集提供两个约束拖累指数：水环境拖累指数量化水环境约束的净效应，能源消耗拖累指数量化能源消耗在水环境约束之上的附加效应。数据集的创新体现在三方面：一是通过模型差分而非回归控制实现约束效应的分离，避免了多重共线性问题；二是创新性提出 WEDI 指数，量化水污染对工业生产率的独立拖累效应，识别城市从“合规成本期”向“规制红利期”的转型路径；三是覆盖 23 年长时序，刻画了完整的政策演化周期，测算结果揭示了 WEDI 的倒 U 型演化特征，识别出 2020−2021 年之交作为长江经济带工业绿色转型的关键节点。

2　数据集元数据简介

《长江经济带沿江城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据集（2000−

2022）》[9]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

表1 《长江经济带沿江城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据集（2000−2022）》元数据简表

条目	描述
数据集名称	长江经济带沿江城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据集（2000−2022）
数据集短名	Ind.GTFP_YREB_2000-2022
作者信息	刘 荣，中国科学院地理科学与资源研究所，中国科学院大学，liur.20b@igsnrr.ac.cn 王振波，中国科学院地理科学与资源研究所，wangzb@igsnrr.ac.cn
地理区域	长江经济带沿江25个核心城市：上游3城（重庆、泸州、宜宾），中游9城（九江、武汉、黄石、宜昌、鄂州、荆州、黄冈、咸宁、岳阳），下游13城（上海、南京、苏州、无锡、南通、扬州、镇江、泰州、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、池州）
数据年代	2000−2022年
时间分辨率	年
数据格式	.xlsx
数据量	214 KB
数据集组成	25个城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据；25个城市的空间信息；计算用到的投入产出数据
数据计算环境	Stata 18、Python 3.9
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲11号100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源[10]
数据和论文检索系统	DOI，CSTR，Crossref，DCI，CSCD，CNKI，SciEngine，WDS，GEOSS，PubScholar，CKRSC，OARL

3 数据研发方法

3.1 数据来源

本研究采用2000−2022年长江经济带25个沿江核心城市的面板数据，共575个观测值（25城×23年）。原始数据来源于《中国城市统计年鉴》（2001−2023）及各城市统计公报。主要指标包括三个方面。

基础投入指标（三层模型均包含）：（1）劳动力投入，工业从业人员年末人数（万人）；（2）资本投入，工业固定资产净值（亿元），以2000年为基期，采用永续盘存法估算；（3）中间投入，主营业务成本（亿元），以各省工业生产者出厂价格指数（PPI）平

减至 2000 年不变价。

资源投入指标（逐层纳入）：（1）工业用水量（万吨），在第二层（$GTFP^{w}$）和第三层（$GTFP^{we}$）中纳入，反映水资源消耗；（2）工业用电量（亿千瓦时），仅在第三层（$GTFP^{we}$）中纳入，反映能源消耗。长江经济带工业用电量占工业终端能源消耗的比重约 30%，且依托丰富的水电资源（三峡工程、金沙江梯级电站），电力是该区域工业部门最主要的清洁能源形式。通过对比 $GTFP^{w}$ 与 $GTFP^{we}$，可识别城市在应对水污染约束时是否付出了过高的能源代价。

产出指标：（1）期望产出，工业总产值（亿元），以 2000 年不变价计算；（2）非期望产出，工业废水排放量（万吨）、工业 COD 排放量（吨）。在第二层（$GTFP^{w}$）和第三层（$GTFP^{we}$）中纳入。

作者对收集到的数据进行预处理，包括：（1）缺失值插补，采用线性插值法处理个别年份缺失数据（占比<2%）；（2）异常值检验，采用 3σ 原则识别极端异常值，并以相邻年份线性插值替换（涉及样本数<1%）；（3）价格平减，采用各省工业生产者出厂价格指数（PPI）将名义值转换为实际值。

3.2　研究方法

3.2.1　三层测度体系

本研究构建三层测度体系，通过逐层纳入环境要素，采用同一方向距离函数框架测算三个模型——三层共用由全部 575 个观测合并构成的全局前沿，以累积指数差分识别各类约束的独立效应（表 2）。

表 2　三层测度体系

层次	效率指标	投入要素	期望产出	非期望产出
第一层	TFP	劳动力、资本、中间投入	工业总产值	占位常数
第二层	$GTFP^{w}$	劳动力、资本、中间投入、**工业用水**	工业总产值	**工业废水、COD**
第三层	$GTFP^{we}$	劳动力、资本、中间投入、工业用水、**工业用电**	工业总产值	工业废水、COD

注：加粗为该层新增或替换要素。第一层不涉及水环境非期望产出，而方向距离函数的构造要求指定该维度；为使三层在测算方法上完全同质，其非期望产出位置置入对所有决策单元均相同的极小常数，该维度不携带截面信息。

三层模型遵循逐层纳入约束的逻辑，且由同一命令、同一方向向量、同一全局生产技术与同一规模报酬设定计算，差异仅在投入产出变量集。第一层（TFP）为基准参照，水环境变量不携带信息；第二层（$GTFP^{w}$）纳入工业用水投入与水污染排放，测算水环境约束下的绿色效率；第三层（$GTFP^{we}$）再纳入能源投入，测算水-能双重约束下的效率。因此第一层至第二层的变化，是投入端增加工业用水、同时非期望产出端由占位常数替换为两项真实排放；第二层至第三层为投入端的纯粹增加。由此以累积指数差分识别各层约束的边际效应：水环境拖累指数（WEDI）为 TFP 与 $GTFP^{w}$ 累积指数之差，能源消耗拖累指数（ECDI）为 $GTFP^{w}$ 与 $GTFP^{we}$ 累积指数之差。序贯分解依赖纳入次序，本文将水置于前，

因水环境约束是长江流域工业转型的首要约束。

3.2.2 全局 Malmquist-Luenberger 指数模型

为在同时考虑期望产出与非期望产出的条件下进行跨期动态比较，本文采用 Chung、Färe 和 Grosskopf[11]提出的方向距离函数与 Malmquist-Luenberger（ML）生产率指数，并参照 Oh[12]的全局生产技术思路，构建全局 Malmquist-Luenberger 指数（GML）模型。测算通过 Stata 的 gtfpch 命令完成[13]。

设决策单元的投入向量为 $x \in R_+^N$，期望产出为 $y \in R_+^M$，非期望产出为 $b \in R_+^J$，构建全局生产可能性集合：

$$P^G(x) = P^1(x^1) \cup P^2(x^2) \cup \cdots \cup P^T(x^T), P^t(x^t) = \left\{ \left(y^t, b^t \right) : x^t \text{可生产} (y^t, b^t) \right\} \tag{1}$$

该集合严格满足非期望产出的弱可处置性（削减污染必须以牺牲部分期望产出为代价）与零结合性（有产出必有污染）。全局生产技术利用全时期数据作为统一的参照前沿，有效避免了当期前沿面下可能出现的线性规划无解与“假性技术退步”。

全局方向产出距离函数定义为：

$$D^G(x, y, b; g) = \max \left\{ \beta : \left(y + \beta g_y, b + \beta g_b \right) \in P^G(x) \right\} \tag{2}$$

式中，$g=(g_y, g_b)$为方向向量，β 为沿该方向期望产出扩张与非期望产出削减的最大比例。本文将方向向量设定为 $g = (y, -b)$，即在要素投入保持不变的前提下，期望产出按自身比例扩张、非期望产出按自身比例削减。该设定契合我国工业绿色转型的核心——在不额外增加要素消耗的前提下，实现“经济增效”与“污染减排”的协同推进。相应的线性规划为：

$$\begin{aligned} &\max \beta \\ &\text{s.t.} \sum_{k,t} \lambda_k^t y_k^t \geq (1+\beta) y_0 \\ &\sum_{k,t} \lambda_k^t b_k^t = (1-\beta) b_0 \\ &\sum_{k,t} \lambda_k^t x_k^t \leq x_0 \\ &\lambda_k^t \geq 0 \end{aligned}$$

其中，λ_k^t 为强度变量，x_0、y_0、b_0 为被评价决策单元的投入与产出，非期望产出约束设定为严格等式，以体现污染物的弱可处置性；强度变量未附加加总约束（$\sum_{k,t} \lambda_k^t = 1$），符合规模报酬不变（CRS）假设。从 t 期到 t+1 期的全局 ML 指数定义为：

$$GML_t^{t+1} = \frac{1 + D^G\left(x^t, y^t, b^t; g \right)}{1 + D^G\left(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; g \right)} \tag{3}$$

GML>1 表示绿色全要素生产率实现增长，GML<1 表示下降。该指数可进一步分解为技术效率变化（EC）与技术进步（TC）：

$$EC_t^{t+1}=\frac{1+D^t\left(x^t,y^t,b^t;g\right)}{1+D^{t+1}\left(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1};g\right)} \tag{4}$$

$$TC_t^{t+1}=\frac{\left[1+D^G\left(x^t,y^t,b^t;g\right)\right]/\left[1+D^t\left(x^t,y^t,b^t;g\right)\right]}{\left[1+D^G\left(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1};g\right)\right]/\left[1+D^{t+1}\left(x^{t+1},y^{t+1},b^{t+1};g\right)\right]} \tag{5}$$

$$GML_t^{t+1}=EC_t^{t+1}\times TC_t^{t+1} \tag{6}$$

式中，D^t 为当期生产技术下的方向距离函数。EC>1 代表实际生产逼近当期生产前沿，体现为管理与配置优化的“效率追赶”；TC>1 代表当期生产前沿向全局前沿外移，体现为绿色技术创新引领的“前沿扩张效应”。EC 与 TC 的分解以当期技术为参照，每年参照集仅含 25 个决策单元，其分辨力低于以全部观测为参照的全局技术，故宜作趋势判读。

3.2.3　派生指标构建

（1）累积生产率指数

以 2000 年为基期（=1），逐年累乘 GML 指数构建累积指数（$GML_{i,t-1}$ 为城市 i 由 t–1 期至 t 期的 GML 指数）：

$$Index_{i,t}=Index_{i,t-1}\times GML_{i,t-1},(t>2000) \tag{7}$$

三条累积指数同以基期归一化为 1，基期之差恒为零、量纲一致，故其差值刻画的是两套核算口径下增长轨迹的偏离，而非两张前沿面之间的距离。

（2）水环境拖累指数（WEDI）

$$WEDI_{i,t}=TFP\ Index_{i,t}-GTFP^{w}\ Index_{i,t} \tag{8}$$

WEDI 量化水环境变量由不携带信息变为携带信息所致的增长轨迹偏离。WEDI>0 表明水污染构成生产率拖累；WEDI<0 表明水污染的负面影响被吸收甚至转化为绿色红利。WEDI 从正转负的年份标志着水治理从“拖累期”进入“红利期”。

（3）能源消耗拖累指数（ECDI）

$$ECDI_{i,t}=GTFP^{w}\ \ Index_{i,t}-GTFP^{we}\ Index_{i,t} \tag{9}$$

ECDI 量化在水环境约束基础上再计入能源约束的附加影响。ECDI>0 表明能源消耗构成附加拖累；ECDI<0 表明能源效率提升带来红利，提示城市实现水-能协同治理。

需说明的是，两项指标为环境约束净效应的方向性判别工具，不等同于污染物的影子价格，其数值大小不宜按基数解读。

4　数据结果

4.1　数据集组成

本数据集内容包括：（1）长江经济带 25 个沿江城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据，包括：无约束、水约束、水-能双约束三种方式的全要素生产率，累积效率指数，水环境拖累指数和能源消耗拖累指数；（2）25 个城市的空间信息；（3）计算用到的投入产出数据。

4.2 总体特征

基于2000−2022年575个观测值的测算结果显示，三条累积生产率指数在样本期内均呈上升趋势。基准TFP年均增速为1.80%，水约束GTFP^{w}为1.84%，水-能双约束GTFP^{we}为1.80%；计入水环境约束后测算的生产率增长略高于基准，再计入能源约束后回落至与基准基本持平（2022年累积指数1.479，基准为1.480），后者反映能源代价对水环境红利的抵偿。从驱动力分解看（图1），技术进步是工业绿色转型的主导力量（上游以效率追赶为主）。2000−2022年GTFP^{we}累积增长47.9%，技术进步和效率改善均为正向贡献，与Porter假说一致[14]：适度的环境规制能够激励企业技术创新和管理优化，推动生产前沿整体移动。

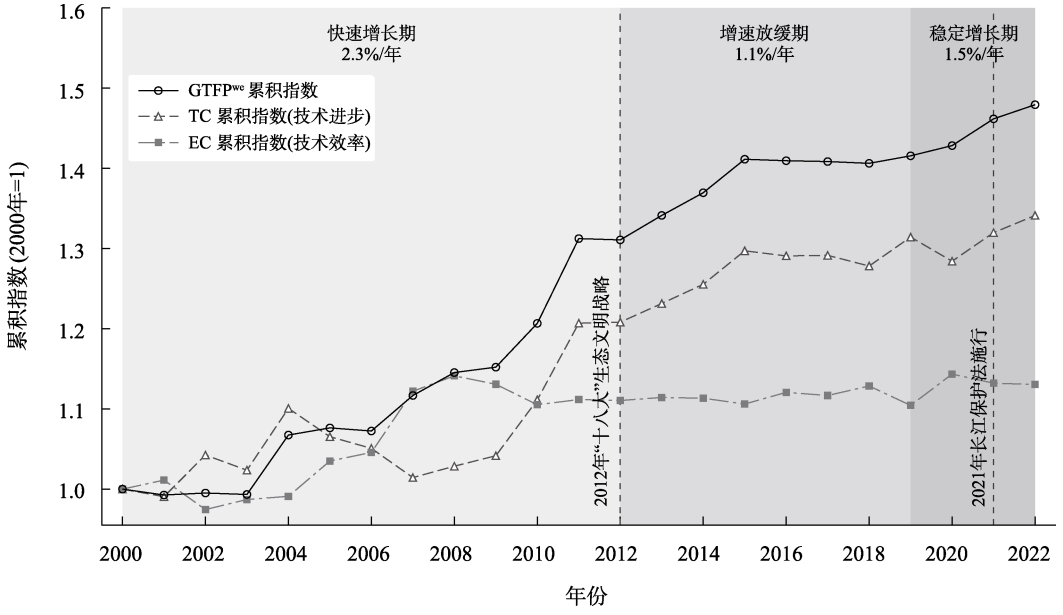


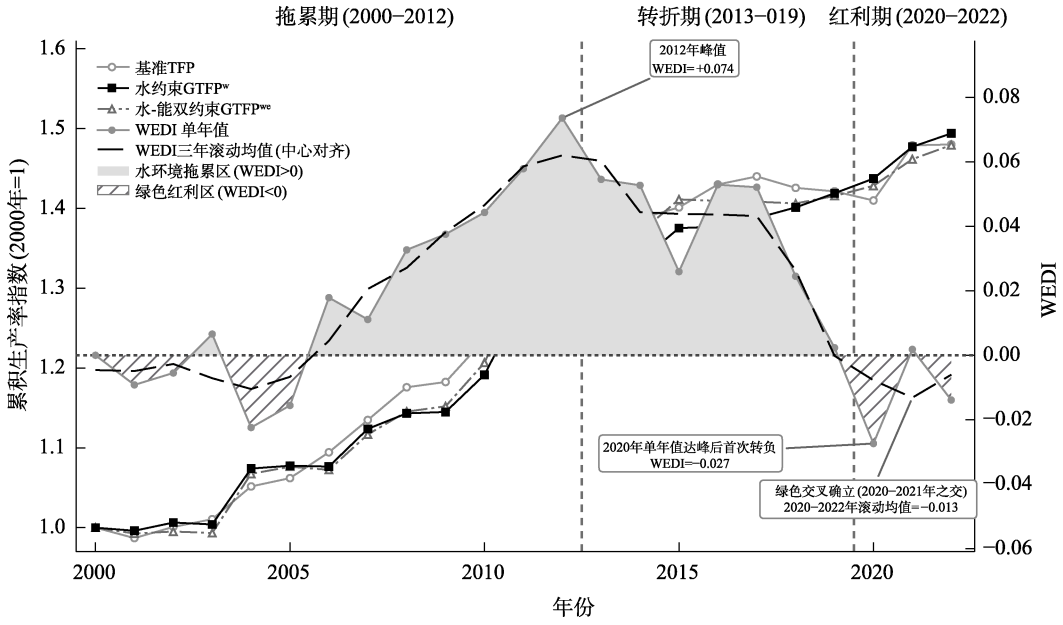
图1 长江经济带沿江城市GTFP^{we}时序演化（2000–2022）

全样本WEDI均值为0.0198，表明整体上水环境约束仍对工业生产率构成轻微拖累，但标准差较大（0.1703），极差达1.5159，表明城市间异质性显著。ECDI均值为−0.0073，标准差为0.0552，说明能源约束的附加效应相对较小且整体为负（能源效率提升带来红利），但同样存在城市间分化。

4.3 水环境拖累指数（WEDI）的时空演化

WEDI呈现典型的“倒U型曲线”（图2），记录了长江经济带工业水污染“积累-爆发-削减”的完整周期。

第一阶段（2000−2012）：拖累期。WEDI在2000−2005年围绕零值小幅波动，2006年起持续上升，至2012年达到峰值0.0736，表明水污染约束对工业生产率的拖累效应持续加剧。这个时期正是沿江城市工业化加速期，重化工业快速扩张，水污染治理投入不足。因此，WEDI上升反映了先污染后治理模式的代价。



注：左轴为以 2000 年为基期（=1）的累积生产率指数；右轴为 WEDI=TFP 累积指数–GTFP^{w} 累积指数，正值表示水环境约束对生产率构成拖累，负值表示该约束已转为绿色红利。WEDI 三年滚动均值为中心对齐，端点采用可得窗口。

图 2　工业生产率演化与水环境拖累指数统计分析图

第二阶段（2013−2019）：转折期。WEDI 从 2012 年的 0.0736 波动下降至 2019 年的 0.0023，接近零点。这个时期“水十条”（2015）、长江共抓大保护战略（2016）相继实施，环境规制强度显著提升，企业通过技术创新应对环境约束，清洁生产技术、循环水系统大规模应用，水污染治理从末端治理转向源头控制。下降过程并非单调：2015 年降至 0.0259 后，2016 年回升至 0.0529、2017 年为 0.0521，2018 年起再度下行。这一“先升后降”的两段式响应反映规制加严初期遵从成本先行、创新补偿滞后显现。

第三阶段（2020−2022）：红利期。长江保护法（2021）正式实施，“共抓大保护”战略进入深化期。WEDI 单年值受年度数据波动影响存在噪声——2020 年单年值在达峰后首次转负（−0.027），2021 年回升至接近零（+0.002），2022 年再次为负（−0.014）。因此，本研究采用三年滚动均值作为判定标尺：滚动均值自 2018–2020 年窗口起转负（−0.0002），2019−2021 年为−0.008，2020−2022 年进一步降至−0.013，“绿色交叉”确立于 2020−2021 年之交。WEDI 转负意味着计入水约束后测算的累积生产率水平高于未计入时，水治理带来的技术创新红利已超过合规成本。

4.4　能源消耗拖累指数（ECDI）的时空演化

ECDI 呈现 U 型曲线（图 3），与 WEDI 的倒 U 型成镜像对称。2000–2007 年，ECDI 在 0−0.0113 之间波动（2002 年最高，2007 年为 0.0071），能源投入构成附加拖累；2008−2013 年在“十一五”“十二五”节能降耗政策推动下，工业部门大规模技术改造，

ECDI 持续下降至谷底−0.0398，能源效率提升转化为红利；2014−2018 年红利逐步收窄，ECDI 回升至−0.0050；2019 年转正（+0.0034），2021 年升至 0.0155，2022 年为 0.0147，标志节能技术边际效益递减，且深度水治理的能源代价开始显现。

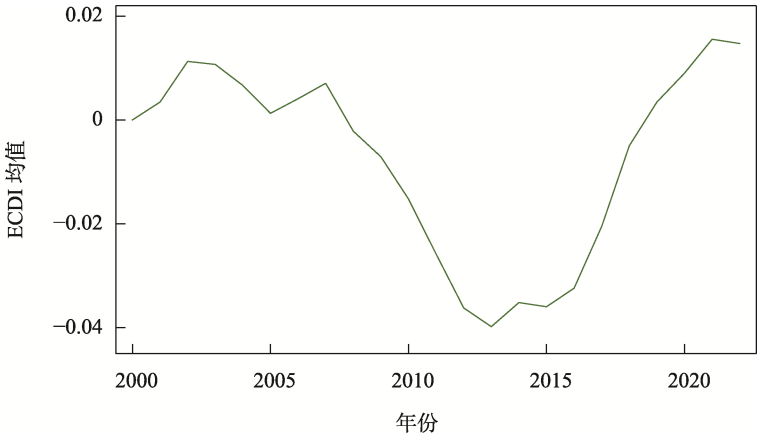


图 3 能源消耗拖累指数（ECDI）演化统计图

WEDI 的倒 U 型与 ECDI 的 U 型形成镜像对称，两者在 2013 年前后出现拐点，揭示了绿色转型的系统性特征：水污染治理需要负熵输入，而负熵输入需要消耗自由能（主要是电力）。WEDI 波动下降（2013−2022）证明了水污染治理有效，但 ECDI 滞后反弹（2019−2022）又揭示，如果水治理技术过度依赖高耗能设备，则水环境改善的绿色红利会被能源消耗的代价抵偿。WEDI 和 ECDI 的镜像关系表明，绿色转型不能是单一目标优化，而应是多重约束下的系统平衡。

4.5 城市异质性：基于 WEDI 的三类转型路径

为平抑单年波动，以下按 2020−2022 年三年均值的 WEDI 将 25 个城市分为三类（图 4）。需说明的是，ECDI 的截面离散度远低于 WEDI（多数城市|ECDI|<0.01，其平均幅度约为 WEDI 的 1/7），不足以支撑独立的分类维度，故本节仅以 WEDI 划分转型路径，ECDI 作为能源代价的辅助标识。

（1）红利型（WEDI<−0.1）：8 个城市

南京、武汉、无锡、重庆、泸州、宜宾、上海、扬州已将水治理转化为生产率红利。其中，WEDI 均值为−0.167，表明水约束不仅不构成拖累，反而通过倒逼技术创新带来了生产率提升。这些城市的成功路径存在差异：武汉、上海等城市依托前瞻性的高新技术产业布局，通过技术创新实现了生产率提升；泸州、宜宾等城市则可能受益于后发优势和对先进技术与管理实践的有效吸收。

值得注意的是，无锡（ECDI=0.0775）和扬州（ECDI=0.0566）在实现水治理红利的同时，付出了较高的能源代价，表明这些城市可能大规模采用了膜处理、深度脱氮等先进但高能耗的污水处理技术。

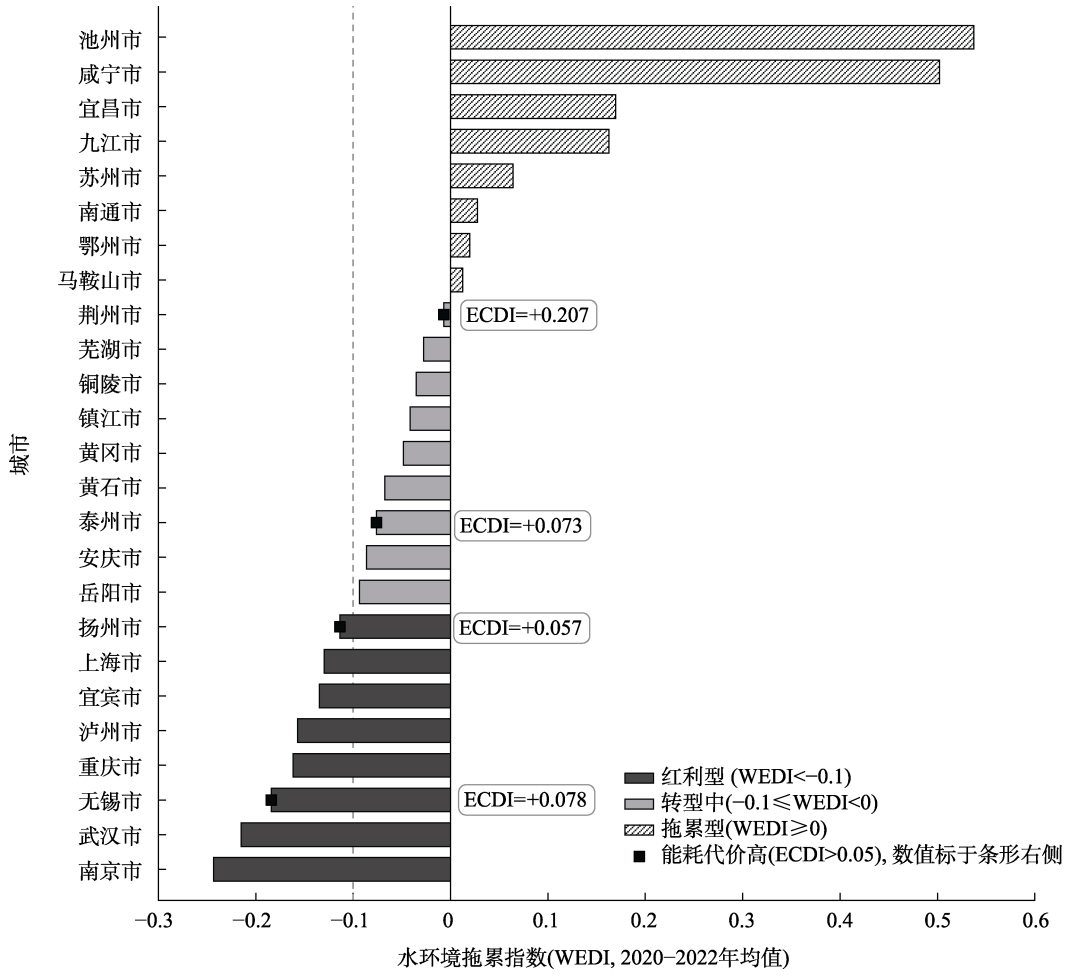


图 4　长江经济带沿江城市水环境拖累指数均值统计图（2020–2022）

（2）转型中（−0.1≤WEDI<0）：9 个城市

岳阳、安庆、泰州、黄石、黄冈、镇江、铜陵、芜湖、荆州的 WEDI 在−0.1 到 0 之间，水治理拖累效应正在消退。其中，WEDI 均值为−0.054，表明这些城市正处于从“合规成本期”向“规制红利期”的过渡阶段。

泰州（ECDI=0.0726）和荆州（ECDI=0.2073）的能源代价较高，尤其是荆州，其 ECDI 高达 0.2073，是所有城市中最高的，提示该城市在水治理过程中可能过度依赖高耗能技术，需要优化技术路径。

（3）拖累型（WEDI≥0）：8 个城市

马鞍山、鄂州、南通、苏州、九江、宜昌、咸宁、池州的水污染仍构成生产率拖累。其中，WEDI 均值为 0.187，表明这些城市的水治理投入尚未转化为生产率红利。咸宁（WEDI=0.5022）和池州（WEDI=0.5374）的问题最严重，WEDI 超过 0.5，表明水污染约束对工业生产率的拖累效应极为显著。

对于苏州、南通等制造业中心而言，这个局面可能反映了“规模效应”的双重性：一方面，规模经济有助于能源效率提升；另一方面，巨大的工业产值基数意味着水资源消耗和污染物排放的绝对总量仍对环境构成压力。

5 讨论与总结

本研究构建了长江经济带沿江城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据集（2000−2022），通过三层递进测度体系实现两方面提升：一是由单一约束测度转向多层约束剥离，通过逐层纳入水污染、能源消耗约束，实现不同环境要素对工业生产率的边际效应量化；二是由静态生产率测度转向动态机制识别，创新性构建水环境拖累指数（WEDI）和能源消耗拖累指数（ECDI），量化水污染、能源消耗对工业生产率的独立拖累效应，识别全流域从“合规成本期”向“规制红利期”的转型路径。

数据结果表明，城市异质性分化是最显著的特征。2020−2022 年间，17 个城市 WEDI 转负（红利型+转型中），8 个城市仍为正值（拖累型），城市间 $GTFP^{we}$ 累积指数最高（泸州，1.840）与最低（池州，0.873）相差 2.11 倍。技术进步是工业绿色转型的主导驱动力。WEDI 呈倒 U 型（2012 年达峰后波动回落），标志着水治理从“拖累期”进入“红利期”；ECDI 呈 U 型（2013 年达谷底后回升），揭示了深度水治理的能源代价。

本数据集可为三类研究提供数据支撑。第一，环境规制政策评估：通过 WEDI 的时序演化，评估“共抓大保护”战略（2016）、长江保护法（2021）等政策对工业生产率的影响及其时滞效应。第二，区域绿色发展路径优化：通过城市间 WEDI 的空间分异，识别“红利型”“转型中”“拖累型”等不同类型城市，为差异化政策设计提供依据。第三，水-能协同治理机制研究：通过 WEDI 与 ECDI 的镜像关系，量化水治理的能源代价，识别高能耗代价城市（无锡、扬州、泰州、荆州），为“水-能纽带”研究提供实证基础。

尽管本数据集在设计与处理上力求严谨，但仍存在以下局限性。当前数据为工业整体，未细化至行业层面（化工、钢铁、电子等），限制了行业异质性分析。在刻画环境约束代价时，本数据集采用同一方向距离函数框架下的指数差分法（WEDI、ECDI），通过对比不同变量集下的生产率指数，反映环境约束对宏观经济效率的影响。该方法在宏观演化趋势与空间格局分析中具有良好的适用性。未来研究可由方向距离函数的对偶关系推导具体污染物的影子价格，拓展本数据集在微观机制研究中的应用深度。当前仅覆盖 25 个沿江核心城市，未包含长江经济带全部 110 个地级及以上城市，限制了流域整体评估。该数据集支持了第一作者理学博士学位论文的完成。

作者分工：刘荣负责研究的总体设计、数据收集与处理、数据可视化及论文初稿撰写；王振波负责研究构思指导、论文审阅与修订。

致谢：作者谨向周雍康博士和赵丽凤博士致以最诚挚的谢意。周雍康博士在论文投稿

过程中提供了持续的无私帮助，赵丽凤博士为本文提供了格式参考，并在初稿阶段提出了宝贵的修改建议。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

[1] 陈诗一. 中国的绿色工业革命：基于环境全要素生产率视角的解释（1980–2008）[J]. 经济研究, 2010, 45(11): 21–34.

[2] 卢丽文, 宋德勇, 黄璨. 长江经济带城市绿色全要素生产率测度——以长江经济带的 108 个城市为例[J]. 城市问题, 2017(1): 61–67.

[3] 长江经济带发展规划纲要[Z]. 2016.

[4] 黄磊, 吴传清. 长江经济带城市工业绿色发展效率及其空间驱动机制研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(8): 40–49.

[5] 陈超凡. 中国工业绿色全要素生产率及其影响因素——基于 ML 生产率指数及动态面板模型的实证研究[J]. 统计研究, 2016, 33(3): 53–62.

[6] 尹礼汇, 孟晓倩, 吴传清. 环境规制对长江经济带制造业绿色全要素生产率的影响[J]. 改革, 2022(3): 101–113.

[7] 原毅军, 谢荣辉. 环境规制的产业结构调整效应研究——基于中国省际面板数据的实证检验[J]. 中国工业经济, 2014(8): 57–69.

[8] 吴遵杰, 巫南杰. 长江经济带绿色经济效率测度、分解及影响因素研究——基于超效率 SBM-ML-Tobit 模型的分析[J]. 城市问题, 2021(1): 52–62, 89.

[9] 刘荣, 王振波. 长江经济带沿江城市工业绿色全要素生产率及水环境拖累指数数据集（2000–2022）[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2026. https://doi.org/10.3974/geodb.2026.04.08.V1. https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2026.04.08.V1.

[10] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).

[11] Chung, Y. H., Färe, R., Grosskopf, S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51(3): 229–240.

[12] Oh, D. H. A global Malmquist-Luenberger productivity index [J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2010, 34(3): 183–197.

[13] Wang, D. P., Du, K. R., Zhang, N. Measuring technical efficiency and total factor productivity change with undesirable outputs in Stata [J]. *The Stata Journal*, 2022, 22(1): 103–124.

[14] Porter, M. E., van der Linde, C. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship [J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, 9(4): 97–118.