

“双碳”目标下长江经济带沿线省份工业用水效率及其地区差距研究¹

李芳芝，李玉林

(安徽财经大学统计与应用数学学院，安徽 蚌埠 233030)

【摘要】：实施工业领域碳达峰行动是实现“双碳”目标的重要任务，提升工业用水效率是实现工业低碳转型的关键，为2030年工业领域碳达峰奠定坚实基础。充分考虑现阶段工业绿色发展的“双碳”目标，将节水减排纳入投入产出指标体系，使用超效率SBM模型、Dagum基尼系数分解和收敛检验，研究2010~2021年长江经济带沿线省份工业用水效率、上中下游地区差距及收敛趋势。实证结果发现：(1)长江经济带沿线省份工业用水效率整体提升缓慢，浙江省、江苏省和上海市工业用水效率位列前三，四川省和云南省比较稳定，湖南省工业用水效率提升幅度较大，安徽省和贵州省则存在下降趋势；(2)长江经济带工业用水效率的总体差距、地区内差距均存在扩大趋势，上下游的地区间差距及波动幅度较大，且地区间与地区内差距的交互作用对总体差距的贡献程度最大；(3)长江经济带工业用水效率的 σ 收敛特征不明显，不同地区的离散程度并未随着时间的推移持续下降，仅在2020~2021年间存在短暂的收敛趋势；但在整个样本期内存在典型的绝对 β 收敛和条件 β 收敛特征，表明工业用水效率较低的地区在奋力缩小与较高地区之间的差距，同时各地区的工业用水效率最终会收敛于自身的稳态水平。因此，提升长江经济带工业用水效率，需要进一步提升工业技术创新能力、加快长江经济带区域一体化建设、推动工业绿色发展。

【关键词】：“双碳”目标；工业用水效率；超效率SBM模型；Dagum基尼系数；收敛

【中图分类号】：X22 **【文献标识码】：**A **【文章编号】：**1004-8227(2023)11-2360-11

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202311011

2020年9月中国明确提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”的“双碳”目标。《2030年前碳达峰行动方案》将工业领域碳达峰行动列为“碳达峰十大行动”之一，说明工业作为中国能源资源消耗和二氧化碳排放的主要领域，能否率先实现“碳达峰”是“双碳”目标实现的关键。而实现水资源高效利用与保护，是国家推进能源结构调整、促进低碳技术发展、应对全球气候变化、实现“双碳”战略目标的共性关键基础。根据《中国水资源公报》，2022年工业用水量为968.4亿m³，占用水总量的16.2%，为我国第二大用水行业。2021年长江经济带沿线省份工业废水排放总量51亿吨，约为2010年的一半，其中仅有贵州省工业废水排放量出现增长现象；而工业领域煤炭消耗量居高不下，消耗占比达到全社会煤炭消耗量的65%以上，工业领域产生的二氧化碳约占总排放量的70%。因此，工业用水效率直接关系到碳排放强度，推进工业水效提升是实现“双碳”目标的关键环节，研究“双碳”目标下的工业用水效率，有利于推动工业领域绿色低碳转型。

进入新时代以来，我国转变经济发展方式，力求在发展速度稳定的情况下实现经济高质量发展。“十二五”规划明确要求

¹ 收稿日期：2023-07-03；修回日期：2023-08-03

基金项目：国家社会科学基金项目(21CTJ024)；安徽省高校哲学社会科学研究项目(2023AH050203)

作者简介：李芳芝(1984~)，女，副教授，主要研究方向为资源环境统计、社会经济统计。E-mail: lifangzhi126@126.com

工业发展应向高质量发展转变，更快实现工业转型升级目标；随后“十三五”规划提出工业传统行业进行绿色化改造，在工业转型升级基础上发展资源节约型、环境友好型工业。随着工业绿色发展的推进，我国工业转型加快，高污染高能耗企业被大批淘汰，产业结构不断优化，绿色低碳产业也初具规模。目前，我国进入“十四五”关键发展阶段，也是我国应对气候变化、实现“双碳”目标的关键期和窗口期。工业领域减污降碳是实现工业领域碳达峰的重要任务，2022年6月国务院发布《减污降碳协同增效实施方案》，提出协同推进减污降碳，其中提升工业用水效率是减污降碳的重要手段。2022年8月《工业领域碳达峰实施方案》再次明确提出，工业企业要推动节水、降碳等系统性清洁生产改造，并落实节水降碳相关税收优惠政策。工业领域作为实现“双碳”目标的关键领域，应坚持把节约能源资源放在首位，从源头减少二氧化碳排放。因此，推进工业水效提升与实现“碳达峰”目标交相辉映，有助于推进减污降碳协同增效，是推动工业用水方式由粗放低效向集约节约利用转变的内在要求，是实现“双碳”目标、促进工业绿色高质量发展的重要途径。开展工业用水效率研究能够实现工业领域碳达峰提供理论支撑，国内外学者主要基于工业用水效率测算、影响因素及空间集聚等问题开展了系列研究。

1 文献综述

现有文献主要使用宏观数据，通过构建投入产出指标体系对工业用水效率进行测算。一些学者利用考虑非期望产出的网络超效率 EBM-Malmquist 模型[1]、综合集成方法[2]和考虑非期望产出的方向性环境距离函数[3]对中国 30 个省市的工业用水效率进行测算，并得出中国各省市工业用水效率的时空差异。还有一些学者对我国重要地区的工业用水效率进行测算，如长江经济带[4,5]、黄河流域[6]和部分工业强省[7,8]，但对于这些重要地区内部，比如长江经济带上中下游的工业用水效率缺乏深入研究。在工业用水效率的指标选取上，一般将工业用水量、从业人员和工业治理投资作为投入指标，工业增加值和工业废水排放量分别作为期望和非期望产出指标[9,10]。何佳音等[11]将单位用水量产值和单位用水量工业增加值作为期望产出，亦有学者在研究工业用水效率时侧重于不良产出[12]。但大多学者没有充分考虑新阶段工业绿色发展的目标，鲜有学者关注节水减排对实现工业碳达峰目标的重要性。

近年来，工业用水量居高不下，我国政府于 2016 年正式试点征收水资源税，水资源税对工业用水效率的影响显著[13]，其中对缺水地区的影响更加明显[14]；约束水资源的使用同样促进工业用水效率的提升，从源头控制水源的浪费[15,16]。工业用水效率的提升同样离不开外部因素的影响：环境约束往往会对工业用水效率产生正向促进作用[17]；城镇化水平的提升和工业转型升级亦可促进工业用水效率的提升[18,19]；技术创新作为工业用水效率提升的根本，工业技术的改革使得节能设施被广泛运用，从而提升工业用水效率[20]。但工业技术创新的集聚现象十分严重，高新企业和高污染企业大多聚集在一起。王凤婷等[21]和朱玲億等[22]通过研究产业集聚和工业集聚现象，解析其对工业用水效率的影响。还有学者对工业用水效率的空间集聚效应进行分析[23,24]，但大都忽略了可能存在的地区间或地区内的差距问题。

综上，现有文献一方面通过使用不同的测算方法对工业用水效率进行测算，同时考虑不同的外部环境对影响因素进行研究，但在工业用水效率的指标选取上，没有充分考虑现阶段工业绿色发展的“双碳”目标；另一方面现有研究集中于工业用水效率在空间上的集聚现象，没有具体分析不同地区的差距及收敛特征。而长江经济带作为我国区域化建设重点地区，上中下游的区位优势 and 劣势都很明显，工业用水效率差距较大，亟需深入开展上中下游地区间及其内部的工业用水效率差距分析。基于此，本文充分考虑新时代工业绿色发展的“双碳”目标，将节水减排纳入工业用水效率投入产出指标体系，并通过 Dagum 基尼系数分解和收敛检验，对长江经济带上中下游地区差距进行深入分析。本文潜在贡献如下：(1)充分考虑现阶段工业领域碳达峰的目标，将节水减排纳入长江经济带工业用水效率的投入产出指标体系；(2)对长江经济带工业用水效率差距进行测算，通过基尼系数分解剖析上中下游地区间及其内部差距的主要成因；(3)对长江经济带工业用水效率进行收敛检验，依据 σ 收敛和 β 收敛检验结果，探索长江经济带工业用水效率的收敛特征。

2 研究设计

2.1 指标选取与数据来源

工业和信息化部等六部门于 2022 年 6 月联合发布的《工业水效提升行动计划》指出，工业水效提升计划需以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，坚持“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路。本文聚焦推动工业领域碳达峰、碳中和目标，重新构建长江经济带工业用水效率的投入产出指标体系(表 1),指标选取依据如下：

(1)工业用水量。

水资源全程参与工业生产，工业用水量的变化是衡量工业用水效率的重要投入指标，工业技术创新也往往集中于工业节水设施，因此选取工业用水量为投入指标之一。

(2)工业污染治理投资。

工业用水效率直接影响工业污染的排放，进一步影响“双碳”目标的实现。工业污染治理投资主要用于工业废水的二次利用和工业废气的净化，从而提升工业用水效率，减少工业碳排放。因此选取工业污染治理投资作为投入指标之一。

(3)煤炭消耗量与天然气消耗量。

工业发展过程中离不开能源的消耗，包括煤炭、焦炭等高污染能源，以及天然气、风力发电等清洁能源。“双碳”目标明确要求各行业应减少使用传统能源，更多使用清洁能源，逐步推进清洁能源对传统能源的替代，本文将煤炭消耗量和天然气消耗量同时纳入投入指标体系。

(4)工业从业人员。

长江经济带沿线 11 个省市，受交通区位、市场环境等因素的制约，劳动力数量以及工业发展差异明显，工业从业人员素质、数量有着较大差异。因此，本文亦将工业从业人员纳入投入指标体系。

(5)规模以上工业企业研究与试验发展(R&D)经费支出。

碳中和目标要求各领域通过节能减排等形式抵消自身产生的二氧化碳，工业企业节水减排离不开技术支撑，规模以上工业企业 R&D 经费支出有助于节水减排设施的研发，从源头控制工业领域碳排放。故本文将规模以上工业企业 R&D 经费支出作为技术投入指标。

(6)工业增加值。

长江经济带各省市的工业发展水平及侧重各有不同，在投入指标水平不一致的情况下，各省的工业增加值产出差异显著。本文选取工业增加值为期望产出指标。

(7)工业污染与碳排放。

工业领域碳达峰行动要求减少碳排放，长江经济带不同省份的工业类型不同，工业污染情况和碳排放强度有所差异。考虑数据的可得性，本文将工业废水排放量和工业生产过程中二氧化碳排放量作为非期望产出指标。

表 1 长江经济带工业用水投入产出指标体系

投入产出指标	类别	指标名称	计量单位
投入指标	劳动力	工业从业人员	万人
	资金	工业污染治理投资	万元
	水资源	工业用水量	亿 m ³
	清洁能源	天然气消耗量	亿 m ³
	传统能源	煤炭消耗量	万 t
	技术创新	工业企业 R&D 经费支出	万元
期望产出指标	工业收益	工业增加值	亿元
非期望产出指标	工业污染	工业废水排放量	万 t
	碳排放	工业生产二氧化碳排放量	万 t

本文以长江经济带 9 省 2 市为研究对象，同时根据我国区域一体化发展战略，进一步细化为上、中、下游地区，其中上游地区包括重庆市、四川省、云南省与贵州省，中游地区包括江西省、湖北省与湖南省，下游地区包括上海市、江苏省、安徽省与浙江省。各指标数据来自 2011~2022 年《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国工业统计年鉴》及各省统计年鉴，其中工业生产二氧化碳排放量由联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)公布的碳排放量计算方法计算得到，具体计算方法见式(1):

$$E_c = \sum_i M_i * c_i \quad (1)$$

式中：i 为能源种类，本文选取包括原煤、焦炭、原油等 9 种能源种类；Mi 为第 i 种能源的消耗量；ci 为能源 i 的二氧化碳排放系数，即每一种能源燃烧或使用过程中单位能源所产生的二氧化碳排放量。

2.2 研究方法

2.2.1 超效率 SBM 模型

超效率 SBM(Slacks-Based Measure)模型在测度不同样本效率值的基础上提供了对比有效样本效率高低的方 法，允许有效样本的效率值大于 1。参考 Tone、卢新海等[25,26],本文构建了包含非期望产出的投入产出指标体系，运用超效率 SBM 模型测算长江经济带工业用水效率情况，并根据超效率值的大小来衡量各省份工业用水效率的高低。

超效率 SBM 模型中每个决策单元(Decision Making Unit, DMU)由投入 m、期望产出 s1 和非期望产出 s2 组成。此时包含非期望产出的超效率 SBM 模型表示为：

$$\rho = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}}{x_{ik}}}{\frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{l=1}^{s_1} \frac{\bar{y}^d}{y_{lk}^d} + \sum_{g=1}^{s_2} \frac{\bar{y}^u}{y_{gk}^u} \right)} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} s. \quad t. \quad & \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; \quad \bar{x} \geq x_k \\ & i = 1, 2, 3, \dots, m; \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{lj}^d \lambda_j; \quad \bar{y}^d \leq y_k^d \\ & l = 1, 2, 3, \dots, s_1; \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \bar{y}^u \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_{gj}^u \lambda_j; \quad \bar{y}^u \geq y_k^u \\ & g = 1, 2, 3, \dots, s_2; \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

式中：n 代表决策单元个数；x、yd、yu 分别表示决策单元的投入矩阵、期望产出矩阵和非期望产出矩阵中的元素； λ_j 为权重系数； ρ 的数值是决策单元的效率值，数值越大表示工业用水效率越高。

2.2.2 Dagum 基尼系数分解

Dagum 基尼系数是一种用于衡量收入不平等程度的指标，可以通过分解结果研究地区间和地区内的差距情况。因而本文借助 Dagum 基尼系数，测算和分解长江经济带上中下游工业用水效率的地区差距，公式如下：

$$G = \sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}| / 2n^2 \bar{Y} \quad (7)$$

式中：G 表示长江经济带工业用水效率的总体 Dagum 基尼系数；k 表示地区个数；n 表示长江经济带省份个数； $y_{ji}(y_{hr})$ 表示 j(h) 地区内省份 i(r) 的工业用水效率； $n_j(n_h)$ 表示上中下游地区 j(h) 内的省份个数； $\bar{Y}$ 表示长江经济带整体工业用水效率均值。G 数值越大，表示长江经济带省份工业用水效率差距越大。差距分解为以下几个部分：

$$G_{jj} = \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |y_{ji} - y_{jr}| / 2n_j^2 \bar{Y}_j \quad (8)$$

$$G_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{n_j n_h (\bar{Y}_j + \bar{Y}_h)} \quad (9)$$

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} P_j S_j \quad (10)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) D_{jh} \quad (11)$$

$$d_{jh} = \int_0^\infty dF_j(y) \int_0^y (y-x) dF_h(x) \quad (12)$$

$$p_{jh} = \int_0^\infty dF_h(y) \int_0^y (y-x) dF_j(x) \quad (13)$$

$$D_{jh} = (d_{jh} - p_{jh}) / (d_{jh} + p_{jh}) \quad (14)$$

$$G_t = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) (1 - D_{jh}) \quad (15)$$

式中： $P_j = n_j/n$ ， $S_j = n_j \bar{Y}_j / n \bar{Y}$ ； G_{jj} 为 j 地区的基尼系数； G_{jh} 为两个地区间的基尼系数； G_w 为地区内部差距对总体基尼系数的贡献度； G_{nb} 为地区间差距对总体基尼系数的贡献度； G_t 则为超变密度的贡献，并满足关系式 $G = G_w + G_{nb} + G_t$ 。Djh 用来衡量两个地区之间的相互影响， d_{jh} 为地区之间的效率差值， p_{jh} 为超变一阶矩。

2.2.3 收敛检验

(1) σ 收敛

σ 收敛在经济学上定义为地区间人均收入的离散程度随时间的推移而趋于下降，在本文中可以反映长江经济带工业用水效率的离散程度随着时间的推移呈现持续下降的过程，通过计算工业用水效率的变异系数来检验 σ 收敛。

$$\sigma_j = \frac{\sqrt{\frac{[\sum_i^{N_j} (effic_{j,i} - \overline{effic_{j,i}})^2]}{N_j}}}{\overline{effic_{j,i}}} \quad (16)$$

式中：j 表示上中下游不同地区；i 表示地区内各个省份；N_j 表示上中下游省份数量；effic_{j,i} 表示不同地区省份工业用水效率。

(2) β 收敛

β 收敛分为绝对 β 收敛和条件 β 收敛，绝对 β 收敛在本文指初始工业用水效率水平低的地区相比工业用水效率水平高的地区具有较快的增长速度，即不同地区工业用水效率的增长率与其初始水平呈负相关。本文构建绝对 β 收敛模型方程如下：

$$\ln\left(\frac{effic_{i,t+1}}{effic_{i,t}}\right) = \alpha + \beta_1 \ln effic_{i,t} + \lambda_t + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (17)$$

式(17)中左侧 effic_{i,t};effic_{i,t+1} 分别表示第 i 个省份在第 t 年和第 t+1 年的工业用水效率；右侧 α 为常数项；β₁ 为回归系数；λ_t 表示时间固定效应；μ_i 表示省份固定效应；ε_{i,t} 表示随机误差项。当 β₁<0 且通过显著性水平检验，则长江经济带工业用水效率存在显著的绝对 β 收敛特征。

条件 β 收敛是在绝对 β 收敛的基础上增加外在影响因素作为控制变量，满足条件 β 收敛特征时，说明长江经济带各地区工业用水效率最终会收敛于自身的稳态水平。本文增加各省的森林覆盖面积(gov_{i,t})和规模以上工业企业专利申请数量(inno_{i,t})作为控制变量，公式如下：

$$\ln\left(\frac{effic_{i,t+1}}{effic_{i,t}}\right) = \alpha + \beta_2 \ln effic_{i,t} + \gamma_1 \ln gov_{i,t} + \gamma_2 \ln inno_{i,t} + \lambda_t + \mu_i + \varepsilon_{i,t} \quad (18)$$

式(18)中 γ₁ 和 γ₂ 为控制变量的回归系数，若 β₂<0 且通过显著性水平检验，即长江经济带工业用水效率存在显著的条件 β 收敛特征。

3 长江经济带工业用水效率测算结果分析

本文利用 MATLAB 编程测算长江经济带 11 个省份工业用水效率的超效率值。考虑非期望产出的工业用水效率测算结果如下表 2 所示。

表 2 长江经济带 2010~2021 年工业用水效率测算结果

省份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	均值	排名
上海	1.13	1.08	1.08	1.23	1.10	1.09	1.11	1.13	1.15	1.18	1.19	1.19	1.14	3
江苏	1.20	1.21	1.06	1.11	1.17	1.15	1.20	1.17	1.15	1.17	1.15	1.23	1.16	2
浙江	1.17	1.16	1.17	1.19	1.19	1.24	1.22	1.20	1.17	1.21	1.16	1.18	1.19	1
安徽	1.05	1.03	0.72	0.55	0.67	0.59	0.48	0.55	0.56	0.52	0.50	0.46	0.65	1
江西	1.20	1.14	1.20	1.09	1.13	1.08	1.06	1.04	1.04	1.03	1.04	1.05	1.09	6
湖北	1.05	1.04	1.08	1.08	1.06	1.12	1.05	1.05	1.03	1.03	1.01	0.80	1.03	9
湖南	0.80	0.88	0.99	0.75	1.02	1.03	1.16	1.15	1.18	1.21	1.27	1.10	1.05	8
重庆	1.03	1.08	1.08	1.01	1.15	1.04	1.13	1.03	1.04	1.04	1.07	1.05	1.06	7

四川	1. 06	1. 08	1. 10	1. 09	1. 10	1. 09	1. 12	1. 12	1. 15	1. 14	1. 13	1. 14	1. 11	5
贵州	1. 16	1. 15	1. 10	1. 10	1. 05	1. 08	1. 12	0. 56	0. 55	0. 46	0. 37	0. 43	0. 84	1 0
云南	1. 15	1. 11	1. 11	1. 17	1. 15	1. 13	1. 14	1. 12	1. 14	1. 13	1. 12	1. 12	1. 13	4
均值	1. 09	1. 09	1. 06	1. 03	1. 07	1. 06	1. 07	1. 01	1. 01	1. 01	0. 99	0. 98	—	—

(1)从各省份均值的时间趋势来看，样本期内长江经济带工业用水效率变动较为平缓，没有出现强烈波动。从时间上可以分为三个阶段：2010~2013 年、2013~2016 年和 2016~2021 年。在第一个周期的四年间，工业用水效率呈现平稳下降趋势，且超效率值都有效，其中 2010 年和 2011 年的 1.09 为样本期内最高值；2013 年之后几年，超效率均值逐年上升，值得注意的是，2014 年之后三年的超效率均值稳定在 1.07 左右，工业用水效率较高；2016~2021 年，工业用水效率逐渐下降，并在 2021 达到样本期内的最低值 0.98,可能的原因是 2020 年和 2021 年处于疫情时期，我国工业发展速度降低，尤其期望产出工业增加值减少幅度较大。在样本期的 12 年间，超效率均值低于 1 的年份有 2 个，且集中于疫情前两年，这表明长江经济带沿线省份工业用水效率存在很大改善空间。

(2)从各省份的超效率值来看，在样本期内，超效率有效的省份占比呈下降的趋势。2010 年，超效率有效的省份为 10 个，占比为 90.1%,无效省份仅有湖南省这一个省份；2011 年，情况与前一年类似，仅有湖南省效率值低于 1;2012~2013 年超效率有效的省份变为 9 个，无效省份变为安徽省和湖南省，且大多省份的超效率值有所下降，可能的原因是 2013 年工业转型升级刚刚开始，部分省份工业转型升级较慢，处于工业转型阵痛期；2014~2016 年，10 个省份超效率有效且超效率无效省份相同；2017~2020 年超效率有效省份发生变化，有两个省份无效，分别为安徽省和贵州省，这也是样本期内无效省份持续最长的一段时间；2021 年新增无效省份湖北省，超效率无效省份为安徽省、贵州省和湖北省，这也是样本期内无效省份最多的一年。在样本期内，安徽省连续十年超效率无效，且效率值在大多数年份都为所有省份最低；贵州省、湖北省和湖南省在样本期内有部分年份无效。可能的原因是：2010 年我国提出工业转型升级计划，长江经济带中下游地区工业基础较好，较早完成了工业转型升级，工业绿色发展水平较高且节水减排设施较为先进；上游地区的四川省和云南省作为我国资源大省，水资源丰富，工业发展新阶段以绿色高新企业为主，节水减排成效显著。

(3)工业用水效率稳定的省份占比较小，大多数省份工业用水效率存在波动。浙江省、江苏省和上海市工业用水效率较高，大多数年份的超效率值在 1.10 以上，均值排名位列前三。四川省和云南省超效率均值也比较稳定，在 1.00 和 1.15 之间上下浮动。安徽省和贵州省超效率值经历了从有效到无效的阶段，前后波动较大；湖南省超效率值则从无效提升到有效。在长江经济带 11 个省市中，贵州省的工业用水效率波动幅度最大，这与贵州省的工业发展战略和地理环境是分不开的，贵州省土地贫瘠，蓄水

条件差，同时工业发展以重工业为主，工业转型升级尚在进行中。

总体来看，长江经济带工业用水效率存在很大的提升空间，在样本期的 12 年间长江经济带总体工业用水效率波动较大，值得注意的是许多省份的工业用水效率在疫情前存在连年降低趋势。安徽省和贵州省工业水效降低趋势十分明显，其中安徽省作为新兴工业大省，处于工业转型升级关键时期，工业用水效率提升较为缓慢；贵州省工业发展较为落后，且主要以劳动密集型产业、传统产业以及重工业产业为主，新兴产业发展处于刚刚起步状态，工业用水效率有很大的提升空间。

4 长江经济带工业用水效率的地区差距及收敛检验

4.1 地区差距分析

本文测算了样本期内长江经济带上中下游地区间、地区内差距，以及超变密度对总体差距的贡献。具体测算结果如表 3 所示。

表 3 Dagum 基尼系数测算及分解

年份	总 体 差距	地区内差距			地区间差距			贡献率(%)		
		上游	中 游	下 游	上 游 - 中 游	中 游 - 下游	上 游 - 下游	地 区 内 差 距	地 区 间 差距	超 变 密度
2010	0.05	0.02	0.08	0.02	0.14	0.14	0.06	26.08	46.69	27.21
2011	0.04	0.01	0.05	0.03	0.10	0.12	0.06	26.12	45.30	28.61
2012	0.05	0.01	0.04	0.08	0.06	0.14	0.10	28.35	37.41	34.22
2013	0.09	0.02	0.07	0.13	0.14	0.24	0.18	28.88	26.94	44.16
2014	0.05	0.02	0.02	0.09	0.04	0.14	0.15	29.66	31.07	39.26
	0.06	0.01	0.01	0.12	0.05	0.16	0.16	30.26	23.11	46.62

2015										
2016	0.07	0.02	0.02	0.14	0.06	0.18	0.18	27.88	37.06	35.01
2017	0.10	0.11	0.02	0.12	0.16	0.19	0.26	31.67	25.07	43.31
2018	0.10	0.12	0.03	0.13	0.18	0.20	0.24	32.07	22.27	45.62
2019	0.12	0.14	0.05	0.12	0.20	0.30	0.30	31.12	26.34	42.53
2020	0.13	0.15	0.07	0.13	0.26	0.22	0.30	30.87	28.15	39.96
2021	0.14	0.14	0.09	0.14	0.24	0.28	0.32	30.96	22.64	46.40

(1)总体差距。

由表 3 可以看出，在样本期内长江经济带工业用水效率的总体差距在波动中上升，2021 年总体基尼系数为 0.14,比 2010 增加 0.09;在 2010~2015 年间，工业用水效率差距波动较为平缓；2015~2021 年间，工业用水效率总体差距逐年上升，2021 年达到样本期内最大值 0.14。这反映出长江经济带工业用水效率总体差距存在进一步扩大的可能。

(2)地区内差距。

进一步分析发现，2021 年，上游、中游和下游地区的 Dagum 基尼系数分别达到 0.14、0.09 和 0.14,上游、中游和下游地区基尼系数样本期内分别增加了 0.12、0.01 和 0.12。从变化过程来看，尽管在样本期内三大地区的内部差距变化幅度各异，但上中下游地区内的差距均呈扩大趋势，上游地区内的工业用水效率差距增速最快，其次是下游地区，中游地区最平稳；从差距大小来看，差距最明显的是上游地区，下游地区次之，中游地区最小。可能的原因是上游地区南北跨度较大，气候条件、资源禀赋和经济发展水平迥异，导致工业用水效率水平存在差距；而中游地区各省资源环境相似，且各省市之间的经济交流密切。

(3)地区间差距。

工业用水效率的地区间差距在样本期内呈波动态势(如图 1 所示),与期初相比，上游-中游、上游-下游、中游-下游的地区间差距均有所扩大，且上游-下游的地区间差距波动最为强烈。可能的解释是：下游地区依托于国家政策扶持，工业转型较快，高新

技术产业聚集，且具有一定的地缘优势；而上游地区人才资源匮乏及经济、技术发展水平滞后，工业用水效率改善效果不太理想，难以缩小与下游地区的发展差距。

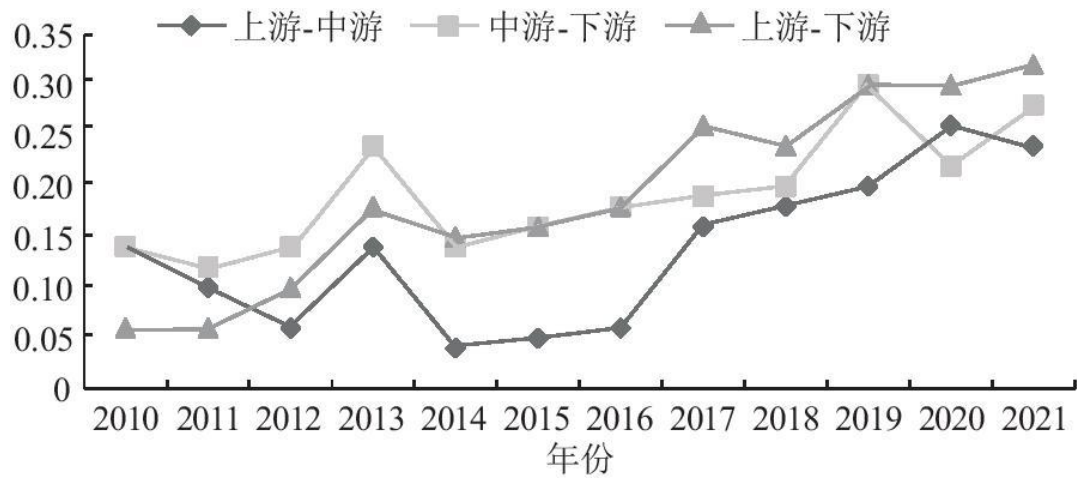


图 1 长江经济带地区间差距趋势图

(4)地区差距的来源及贡献。

地区间差距与地区内差距的交互作用(超变密度)是造成总体差距的主要原因，并且这种作用在逐渐增强；地区内差距贡献较为固定，在 30%上下浮动；而地区间差距贡献在样本期内波动强烈。可能的原因是长江经济带作为一个整体，上中下游地区经济、文化和人才交流密切，尤其工业产业转移密切相关。因此，要实现区域工业用水协调发展，既要缩小上中下游地区内的差距，采取差别化措施充分发挥各地区的优势，同时还要将上中下游三大地区的工业发展改革纳入统一框架。

4.2 收敛分析

(1) σ 收敛分析

图 2 绘制了长江经济带沿线省份 σ 收敛系数的变化趋势。总体来看，2010~2021 年间 σ 收敛系数呈现降-升-降-升的 W 型波动，总体呈上升趋势，由 2010 年的 0.101 0 上升至 2021 年的 0.279 3。值得注意的是，2014~2020 年一直是稳步上升的，这反映长江经济带总体工业用水效率不存在 σ 收敛趋势，不同地区的离散程度并未随着时间的推移呈现持续下降。

从上中下游三个地区来看，上游地区在 2010~2012 年间存在下降趋势，呈现短暂的收敛特征，但随时间的变化呈现急剧上升趋势，发散现象明显，因此上游地区工业用水效率变化趋势不存在 σ 收敛特征。下游地区和中游地区 σ 收敛系数变化趋势较为相似，均为降-升-降-升的 W 型波动，且最终上升幅度较大，因此中游地区和下游地区均不存在 σ 收敛特征。值得注意的是，在 2020~2021 年间，上游地区的 σ 收敛系数存在下降趋势，这也意味着上游地区工业用水效率存在短暂的收敛特征。

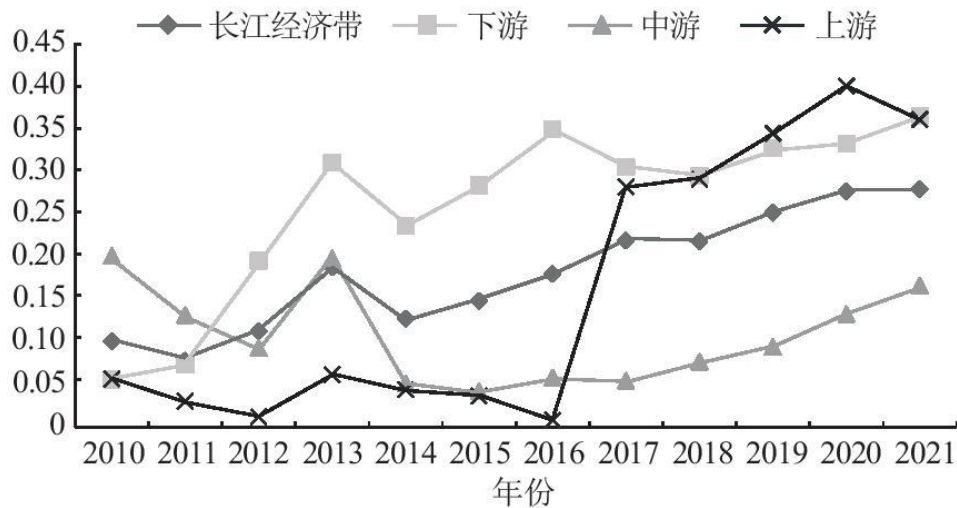


图 2 2010~2021 年工业用水效率 σ 收敛系数变化趋势

(2) β 收敛分析

根据式(17)和式(18)分别对长江经济带总体、上游地区、中游地区和下游地区的工业用水效率进行 β 收敛检验, 为此进行面板数据回归估计。首先根据豪斯曼检验结果, p 值都小于 0.01, 故选择固定效应模型。绝对 β 收敛检验的回归结果(表 4)显示, 总体和分地区样本的 β 系数都至少在 5% 的显著性水平下显著为负, 因此可以判断长江经济带工业用水效率存在典型的绝对 β 收敛特征, 这表明工业用水效率低的地区在向工业用水效率高的地区追赶。

表 4 长江经济带工业用水效率绝对 β 收敛检验结果

变量	总体	上游	中游	下游
ln _{effic}	-0.253 2*** (0.603 5)	-0.135 3** (0.091 3)	-0.413 3*** (0.145 2)	-0.402 1*** (0.372 4)
_cons	0.255 6*** (0.638 8)	0.127 4** (0.096 4)	0.436 2*** (0.155 2)	0.404 4*** (0.562 5)
R ²	0.571 4	0.367 6	0.534 9	0.486 0
N	121	42	33	42

注: 括号内为估计标准误。* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ 。

接下来增加森林覆盖面积(gov)和规模以上工业企业专利申请数量(inno)作为控制变量进行条件 β 收敛检验，检验结果如表 5 所示。

表 5 长江经济带工业用水效率条件 β 收敛检验结果

变量	总体	上游	中游	下游
lneffc	-0.463 2** (0.371 6)	-0.346 3** (0.431 3)	-0.734 4*** (0.572 4)	-0.631 2*** (0.598 3)
lngov	0.045 3 (0.043 1)	0.038 1 (0.021 2)	0.084 2* (0.064 1)	0.013 2 (0.014 3)
lninno	0.175 7* (0.166 4)	0.140 6* (0.124 2)	0.228 3** (0.204 4)	0.274 4** (0.239 1)
_cons	0.494 1** (0.362 6)	0.431 3** (0.472 4)	0.672 1*** (0.431 6)	0.614 4*** (0.575 5)
R2	0.464 3	0.436 6	0.665 4	0.553 5
N	121	42	33	42

注：括号内为估计标准误.* $p<0.1$, ** $p<0.05$, *** $p<0.01$.

在增加了控制变量的情况下，条件 β 收敛系数都为负，且至少在 10%的显著性水平下显著为负，因此可以判断长江经济带工业用水效率存在典型的条件 β 收敛特征，表明不同地区的工业用水效率随着时间的推移收敛于自身的稳态水平。

5 主要研究结论与建议

5.1 主要研究结论

本文首先充分考虑现阶段工业绿色发展的“双碳”目标，将节水减排纳入长江经济带工业用水效率的投入产出指标体系，使用超效率 SBM 模型测算长江经济带 11 个省市 2010~2021 年的工业用水效率；其次测算长江经济带工业用水效率的 Dagum 基尼系数，通过基尼系数分解剖析上中下游地区间及其内部差距的主要成因；然后对长江经济带工业用水效率进行收敛检验，依据 α 收敛和 β 收敛检验结果，探索长江经济带工业用水效率的收敛趋势。主要研究结论如下：

(1)长江经济带整体工业用水效率有很大的提升空间。浙江省、江苏省和上海市工业用水效率较高，超效率值一直在 1.10 以上，均值排名位列前三。四川省和云南省超效率均值也比较稳定，在 1.00 和 1.15 之间上下浮动；安徽省和贵州省超效率值经历了从有效到无效的阶段，工业用水效率存在下降趋势；湖南省超效率值则从无效转为有效，工业用水效率存在明显的提升。值得注意的是，浙江省、江苏省和上海市等部分省份在 2021 年工业用水效率出现提升，可能的原因是受疫情影响，部分工业企业停工停产，导致非期望产出大幅减少。

(2)长江经济带工业用水效率的总体差距、地区内差距均存在扩大趋势，其中上游地区和下游地区的工业用水效率差距扩大速度最快，而上游地区和下游地区之间差距的扩大趋势排在三大地区间首位。地区间差距与地区内差距的交互作用(超变密度)是长江经济带工业用水效率差距的最主要来源，地区间差距贡献度相对较小。

(3)长江经济带和上中下游的 σ 收敛系数在波动中上升，意味着长江经济带的 σ 收敛特征不明显，不同地区的离散程度并未随着时间的推移呈现持续下降，仅在 2020~2021 年间存在短暂的收敛趋势。从 β 收敛回归结果来看，无论是未考虑其他因素的绝对 β 收敛，还是考虑到外在因素的条件 β 收敛，回归结果均显示长江经济带工业用水效率存在显著的 β 收敛特征，这表明工业用水效率较低的地区在向工业用水效率较高的地区追赶，同时各地区的工业用水效率收敛于自身的稳态水平。

5.2 建议

(1)对于工业用水效率较低的安徽省、贵州省等省份应密切关注工业企业碳排放情况，做好节能减排工作，从源头减少碳排放；浙江省、上海市和江苏省工业用水效率较高，应持续加大工业企业研发投入，有效推动科技成果转化；湖北省、湖南省等省份工业用水效率存在提升空间，应加快工业转型升级步伐，重点发展高新技术产业，建立高新技术产业园区。

(2)加快长江经济带区域一体化建设，促进要素跨区域自由流动，缩小工业用水效率差距。长江经济带各地区发挥自身优势，协同分工，推进长江经济带区域一体化。下游地区做好龙头带动作用，主动构建与上、中游地区之间的交流渠道，分享先进节能减排技术核心要素；上、中游地区在做好产业承接工作的同时，要注意筛选高污染、高能耗工业企业，加快发展绿色低碳产业。

(3)各地区将推动“双碳”目标如期实现作为工业绿色发展的总体目标。长江经济带上游地区能源资源众多，各省要做好统领工业领域减排降碳和能源资源高效利用工作；中游地区工业领域传统行业占比较高，要以节能减排为导向对传统行业进行绿色化改造；下游地区发挥好示范引领作用，带动长江经济带整体实现工业领域碳达峰目标。

参考文献：

[1]姬志恒，于伟.中国工业用水效率的空间差异及驱动机制[J].工业技术经济，2022, 41(12): 86-93.

Ji Z H, Yu W. Spatial difference and driving mechanism of industrial water use efficiency in China[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2022, 41(12): 86-93.

[2] LIU X, YUAN Y, YU X, et al. Evaluation of China industrial water efficiency based on DAGF method [J]. Desalination and Water Treatment, 2018, 121: 180-185.

[3] 岳立，赵海涛.环境约束下的中国工业用水效率研究——基于中国 13 个典型工业省区 2003 年-2009 年数据 [J].资源科学，2011, 33(11): 2071-2079.

YUE L, ZHAO H T. China' s water use efficiency of industry under environmental constraints based on data of 13 industrial regions during the period 2003 to 2009 [J]. Resources Science, 2011, 33(11) : 2071-2079.

[4]尹庆民, 朱康宁.基于 EBM 模型的长江经济带工业用水 效率时空差异及影响因素分析[J].中国环境管理, 2020, 12(6) : 103-109.

YIN Q M, ZHU K N. Analysis on the spatial and temporal differences and influencing factors of industrial water efficiency in the Yangtze River economic belt based on EBM model [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12 (6) : 103- 109.

[5]张熙悦, 孙芳城, 王怀祖.基于“生产——治理”两阶段评 价的长江经济带工业水资源绿色效率研究[J].江西财经 大学学报, 2020(2) : 26-36.

ZHANG X Y, SUN F C, WANG H Z. A study of the green efficiency of industrial water resource in Yangtze River economic zone based on the two- stage evaluation of production and treatment [J] . Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2020(2) : 26-36.

[6]党丽娟.黄河流域工业用水效率提升策略研究[J].人民 黄河, 2023, 45(1): 76-81.

DANG L J. Study on promotion strategy of industrial water use efficiency in Yellow River Basin[J] . Yellow River, 2023, 45 (1): 76-81.

[7] WANG H, LIU H, WANG C , et al. A study of industrial relative water use efficiency of Beijing: An application of data envelopment analysis[J]. Water Policy, 2019, 21(2): 326-343.

[8] SHANG Y, WANG J, YE Y, et al. An analysis of the factors that influence industrial water use in Tianjin, China[J] . International Journal of Water Resources Development, 2017, 33 (1) : 81-92.

[9]孙爱军, 董增川, 王德智.基于时序的工业用水效率测算 与耗水量预测[J].中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 547-553.

SUN A J, DONG Z C, WANG D Z. Prediction of technical efficiency and water consumption of industrial water in China based on time series[J] . Journal of China University of Mining & Technology, 2007 , 36(4) : 547-553.

[10] 李 珊, 张玲玲, 丁雪丽, 等.中国各省区工业用水效率 影响因素的空间分异[J].长江流域资源与环境, 2019, 28(11) : 2539-2552.

LI S , ZHANG L L, DING X L, et al. Spatial differentiation analysis of factors affecting industrial water use efficiency in China' s Provinces[J] . Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(11) : 2539-2552.

[11] 何佳音, 王红瑞.湖南省工业用水效率影响因素分析及结 构调整对策[J].水电能源科学, 2022, 40(7) : 53-57.

HE J Y, WANG H R. Industrial water utilization efficiency index and countermeasures of structure adjustment in Hunan P rovince[J] . Water Resources and Power, 2022 , 40 (7) : 53 -57.

[12] SHI C, ZENG X, YU Q, et al. Dynamic evaluation and spatiotemporal evolution of China ' s industrial water use efficiency considering undesirable output[J] . Environmental Science and Pollution Research, 2021 , 28 (16) : 20839- 20853.

[13] 卫梦龙.水资源税对工业用水效率的影响分析[J].水利技术监督, 2023, 31(4): 218-220, 256.

WEI M L. Impact analysis of water resource tax on industrial water efficiency [J] . Technical Supervision in Water Resources, 2023, 31(4): 218-220, 256.

[14] 田贵良, 高廷艳.水资源税改革对缺水地区工业用水效率 的影响[J].资源与产业, 2022, 24(3): 43-52.

TIAN G L, GAO T Y. Impacts of water resource tax reform on industrial water use efficiency in water shortage areas [J] . Resources & Industries, 2022, 24(3): 43-52.

[15] 张翔宇, 李玉娟, 张国玉, 等.最严格水资源管理制度对 工业用水效率的影响[J].长江科学院院报, 2020, 37 (5): 23-27.

ZHANG X Y, LI Y J, ZHANG G Y, et al. Impact of the most stringent water resource management system on industrial water use efficiency[J] . Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(5) : 23-27.

[16] 俞昊良, 鲁亚军, 杨研, 等.最严格水资源管理制度实 施背景下工业用水效率的影响因素研究[J].水利发展研 究, 2017, 17(8): 8- 13.

YU H L, LU Y J, YANG Y, et al. Study on influencing factors of industrial water efficiency under the background of the strictest water resources management system [J] . Water Resources Development Research, 2017, 17 (8) : 8 - 13 .

[17] 张 峰, 王 晗, 薛惠锋.环境资源约束下中国工业绿色 全要素水资源效率研究[J].中国环境科学, 2020, 40 (11): 5079-5091.

ZHANG F, WANG H, XUE H F. China' s industrial green total factor water efficiency under the constraints of environment and resource [J] . China Environmental Science, 2020, 40 (11): 5079-5091.

[18] DING X, FU Z, JIA H. Study on urbanization level, urban primacy and industrial water utilization efficiency in the Yangtze River economic belt [J]. Sustainability, 2019, 11 (23): 6571.

[19] SHI Q, CHEN S, SHI C, et al. The impact of industrial transformation on water use efficiency in northwest region of Chi-na[J]. Sustainability, 2014 , 7(1): 56-74.

[20] 何 冈L赵杨秋,阮 君,等.安徽省工业用水效率及影 响因素时空分异解析[J].安全与环境学报,2022, 22 (3): 1671-1679.

HE G, ZHAO Y Q, RUAN J, et al. Analysis on the temporal and spatial differentiation of industrial water efficiency and influencing factors in Anhui Province[J] . Journal of Safety and Environment, 2022 , 22 (3) : 1671 - 1679.

[21] 王凤婷, 田 园, 程宝栋.产业集聚对工业用水效率的影 响[J].城市问题, 2018(12): 80-88.

WANG F T, TIAN Y, CHENG B D. Influences on industrial water use efficiency by industrial agglomeration [J] . Urban Problems, 2018(12) : 80-88.

[22] 朱玲值, 潘钰霞, 吴易桐, 等.工业集聚下中国工业用水 效率和重心迁移研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理 工程版), 2022, 44(2) : 286-291, 338.

ZHU L Y , PAN Y X, WU Y T, et al. Study on industrial water efficiency in China and center of gravity migration based on industrial agglomeration [J] . Journal of Wuhan University of Technology(Information & Management Engineering) , 2022, 44(2) : 286-291, 338.

[23] 陈东景, 冷伯阳.中国工业用水强度下降的省际贡献差异 与空间相关性[J].水利经济, 2021, 39(5) : 44-49, 81. CHEN D J, LENG B Y. Inter - provincial contribution to decrease of industrial water use intensity and spatial correlation in China [J] . Journal of Economics of Water Resources, 2021 , 39(5) : 44-49, 81.

[24] CHEN Y , YIN G, LIU K. Regional differences in the industrial water use efficiency of China: The spatial spillover effect and relevant factors [J] . Resources, Conservation and Recycling, 2021, 167: 105239.

[25] TONE K. A slacks-based measure of super- efficiency in data envelopment analysis[J] . European Journal of Operational Research, 2002, 143(1) : 32-41.

[26] 卢新海, 杨 喜, 陈泽秀.中国城市土地绿色利用效率测 度及其时空演变特征[J].中国人口 -资源与环境, 2020, 30(8) : 83-91.

LU X H, YANG X, CHEN Z X. Measurement and temporal-spatial evolution characteristics of urban land green use efficiency in China [J] . China Population , Resources and Environment, 2020, 30(8) : 83-91.