

引用格式:邓淇中,张玲.长江经济带水资源绿色效率时空演变特征及其影响因素[J].资源科学,2022,44(2):247-260.[Deng Q Z, Zhang L. Spatiotemporal pattern and influencing factors of green efficiency of water resources in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources Science, 2022, 44(2): 247-260.] DOI: 10.18402/resci.2022.02.03

长江经济带水资源绿色效率时空演变特征及其影响因素

邓淇中,张玲

(湖南科技大学商学院,湘潭 411201)

摘要:长江经济带是中国重要的水资源聚集区、水生态功能区,其水资源绿色效率问题直接影响了生态系统质量和稳定性。本文从高质量发展视角,构建了长江经济带110个城市水资源绿色效率评价指标体系,采用定基极差熵权法、超效率EBM模型和GML生产率指数以及空间面板分位数回归等计量方法,对水资源绿色效率的时空演变特征及其影响因素等问题进行测度与识别。结果表明:①从时序演变来看,2005—2018年长江经济带水资源绿色效率总体水平呈高低交错状的波动上升趋势,先后经历了“稳增期”“振落期”“提速期”等3个阶段。②从空间格局来看,长江经济带水资源绿色效率空间分异特征显著,水资源绿色效率较高的地区主要是经济发达的中心或副中心城市,数值较低的城市大多集聚在中、上游经济不发达地区,表现出由高向低的扩散迹象,且在全局空间检验中发现存在正的自相关性,局部空间存在集聚现象和溢出效应。③从影响因素来看,产业结构、经济发展水平、资源禀赋、科学技术水平、政府管制力度以及对外贸易程度对水资源绿色效率均有显著影响,但在不同分位点下的水资源绿色效率,其驱动因素的影响方向与力度均有差异,该结论在一系列稳健性检验之后仍旧成立。最后,根据长江经济带水资源绿色效率时空演变趋势和规律,有针对性地提出了相关政策建议。

关键词:长江经济带;水资源绿色效率;高质量发展;时空演变;影响因素;超效率EBM模型;空间面板分位数模型

DOI: 10.18402/resci.2022.02.03

1 引言

水资源作为关乎国计民生的基础性自然资源和战略性经济资源,对经济社会发展稳定和人民健康福祉提升具有至关重要的作用。长江经济带作为中国新一轮改革开放转型实施区域与生态宝库,在经济实现快速发展的同时也面临着严峻的资源环境压力。2017年《长江经济带生态环境保护规划》显示,长江经济带污染排放总量大、强度高,废水排放总量占全国的40%以上。长期以来的水资源短缺且分布不均衡、水资源利用效率较低等问题未能得到根本性解决;城镇化和工农业发展等经济

社会活动所产生的大量废污水排放量远超水环境承载力等现状,都已成为人民群众强烈反映的社会问题,这与实现长江经济带高质量发展的目标仍有较大差距。2016年至今,习近平总书记多次在长江经济带发展座谈会上强调:“把修复长江生态环境摆在压倒性位置,共抓大保护、不搞大开发”;“探索出一条生态优先、绿色发展新路子”;“使长江经济带成为中国生态优先绿色发展主战场、畅通国内国际双循环主动脉、引领经济高质量发展主力军”。在此背景下,重新审视人水关系,探究长江经济带水资源绿色效率发展现状、时空演变特征及影响因

收稿日期:2021-06-03;修订日期:2021-09-10

基金项目:国家社会科学基金项目(21BJY122)。

作者简介:邓淇中,男,湖南醴陵人,教授,博士生导师,主要研究方向为环境与发展经济学。E-mail: dqzdesertsea@163.com

通讯作者:张玲,女,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向为区域经济学。E-mail: 495789041@qq.com

素机理,对改善区域生态环境、水域生态功能以及经济高质量发展都将具有重要意义。

通过对当前文献的回顾和研读,发现水资源绿色效率研究主要集中在理论内涵、效率测度和因素诊断等3个方面。①关于水资源绿色效率理论内涵。该概念在传统水资源效率理论基础上,引入了水环境污染因素,其目的是减少或剔除社会生产中的非期望产出以及最小化水资源等相关生产要素的投入^[1-3]。众所周知,提高水资源效率的最终目标是改善人类福祉、增加人民幸福感,这也是高质量发展的根本要求。在此基础上,孙才志等^[4]、杨高升等^[5]、潘忠文等^[6]基于“以人为本”的绿色发展理念,提出水资源绿色效率应是水资源等生产要素投入带来的经济、社会、生态环境多因素均衡发展的综合效率。②关于水资源绿色效率测度。国内外学者利用数据包络分析方法,将经济效益和水污染等作为产出指标纳入水资源绿色效率分析框架,这也逐渐成为水资源绿色效率测度的主流方式。如李俊鹏等^[7]、徐承红等^[8]基于SBM-DEA模型对中国水资源绿色效率进行了评价;赵良仕等^[9]、Guo等^[10]、张峰等^[11]则分别研究了不同省域水资源绿色效率发展情况;高孟菲等^[12]、汪克亮等^[13]、张玮等^[14]基于径向和非径向距离函数(EBM模型)分别对黄河流域和长江经济带水资源绿色效率进行了测度与评价。③关于水资源绿色效率影响因素诊断。学者们采用门槛模型^[8]、Tobit模型^[9]、收敛性检验^[11]以及广义矩估计模型^[15]等计量方法考察了各种因素对水资源绿色效率的驱动效应和影响机理。王保乾等^[16]、孙才志等^[17]进一步地将含有空间效应的空间计量方法引入水资源绿色效率分析框架,采用空间回归模型考察水资源绿色效率多维空间驱动效应。基于上述研究,已有文献指出水资源绿色效率的影响因素主要包括经济发展水平^[6]、科学技术水平^[13]、产业结构^[18]、水资源禀赋^[19]等。

综上可知,国内外学者对水资源绿色效率的研究已取得了较为丰硕的成果,但仍有如下问题值得进一步深入探讨。首先,在水资源绿色效率测度中常用经济效益来衡量期望产出,鲜有文献从高质量发展视角,立足经济、社会和环境多维度构建水资源绿色效率评价指标体系。其次,已有文献较少从时空双重维度揭示水资源绿色效率的时序演化规

律和空间分异特征,也暂未分区域探索各类导致长江经济带水资源绿色效率趋势化和异质性的关键因素,以及如何科学估算其影响因素、方向和大小等问题。基于此,本文运用超效率Epsilon-Based Measure(EBM)模型和Global Malmquist-Luenberger(GML)生产率指数,对2005—2018年长江经济带地级及以上城市(以下简称“城市”)的水资源绿色效率进行测度评价,并通过空间计量模型探究水资源绿色效率的影响因素。可能的创新点在于:①以推动长江经济带高质量发展为评价目标,对水资源绿色效率产出指标体系进行科学重构;②通过建立空间面板分位数模型,系统分析水资源绿色效率的区域异质性和空间溢出效应。本文结果旨在为政府决策部门设计长江经济带水资源绿色效率提升路径,提供科学依据和实证参考。

2 方法、指标与数据

2.1 研究方法

2.1.1 EBM模型

为克服传统数据包络分析方法未考虑松弛变量以及损失效率前沿投影值原始比例信息的缺陷,Tone等^[20]提出了包含径向和非径向的Epsilon-Based Measure(EBM)模型。EBM模型虽放宽了要素同比例增长或者减少的假设,能最大限度地保留前沿投影值的原始比例信息,但其无法对效率值为1的决策单元进行逐一比较。针对这一问题,Andersen等^[21]提出了超效率DEA模型,该模型的主要特点为在测算第 k 个决策单元时将其自身剔除,而用其他决策单元投入和产出的线性组合来代替自身组合,可对多个处于前沿位置的决策单元展开进一步比较。因此,本文构建的超效率EBM模型充分考虑了效率值的可比性问题,将每个城市作为一个决策单元,构造不同城市水资源绿色效率投入产出的最佳前沿面。假设在 t 时期($t=1, \dots, T$),有 n 个决策单元 $DMU_j(j=1, \dots, n)$,每个决策单元有 m 种投入 $x_{ij}(i=1, \dots, m)$, s 种期望产出 $y_{rj}(r=1, \dots, s)$, p 种非期望产出 $b_{zj}(z=1, \dots, p)$,则考虑非期望产出约束的超效率EBM模型形式如下:

$$\rho^* = \min \frac{\theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^m \frac{w_i^- s_i^-}{x_{ik}}}{\varphi + \varepsilon_y \sum_{r=1}^s \frac{w_r^+ s_r^+}{y_{rk}} + \varepsilon_b \sum_{z=1}^p \frac{w_z^- s_z^-}{b_{zk}}} \quad (1)$$

2022年2月

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j + s_i^- = \theta x_{ik}, i=1, \dots, m \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j - s_r^+ = \phi y_{rk}, r=1, \dots, s \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n b_{zj} \lambda_j + s_z^{b-} = \phi b_{zk}, z=1, \dots, p \\ \lambda_j \geq 0, s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0, s_z^{b-} \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ^* 表示决策单元的综合效率; x_{ik} 、 y_{rk} 和 b_{zk} 分别为被预测决策单元 k ($k=1, \dots, n$) 的投入、期望产出和非期望产出; s_i^- 、 s_r^+ 和 s_z^{b-} 分别为投入指标 i 、期望产出指标 r 和非期望产出指标 z 的松弛变量; w_i^- 表示各项投入指标 i 的相对重要性, w_r^+ 和 w_p^{b-} 分别表示期望产出和非期望产出指标 (r 和 z) 的相对重要性; θ 和 ϕ 分别为投入和产出导向下的水资源绿色效率值; ε_x 、 ε_y 、 ε_b 分别表示在效率值计算中投入、期望产出和非期望产出非径向部分的重要程度; λ_j 为线性组合系数。

2.1.2 GML 生产率指数

使用 Global Malmquist-Luenberger (GML) 生产率指数评价长江经济带水资源绿色效率的动态变化情况,能有效避免 Malmquist-Luenberger (ML) 生产率指数线性规划的无解性及传递性不足等问题,且可有效观测长江经济带水资源绿色效率变化趋势。本文基于超效率 EBM 模型,参考 GML 生产率指数分解思路计算长江经济带 2005—2018 年水资源绿色效率。以 GML 表示 GML 生产率指数,其因子分解公式如下:

$$\begin{aligned} GML(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, x^t, y^t, b^t) &= \frac{E(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{E(x^t, y^t, b^t)} \\ &= \frac{E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{E^t(x^t, y^t, b^t)} \left(\frac{E(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \frac{E(x^t, y^t, b^t)}{E^t(x^t, y^t, b^t)} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: E 表示参考集在同一全局前沿上所测算的效率值; x^t 、 y^t 、 b^t 和 x^{t+1} 、 y^{t+1} 、 b^{t+1} 的分别表示决策单元在 t 和 $t+1$ 时期的投入、期望产出和非期望产出值; GML 表示水资源绿色效率, $GML > 1$ 表明水资源绿色效率提升, $GML < 1$ 则表明水资源绿色效率下降。

2.1.3 空间面板分位数模型

考虑长江经济带 110 个城市的水资源绿色效率可能存在空间相关性和异质性,以及为克服普通分

位数模型忽略空间溢出效应造成的估计偏误,参考李坤明等^[22]、方丽婷等^[23]、王周伟等^[24]研究,构建空间滞后形式的面板分位数回归模型来考察各影响因素在不同区域的空间溢出效应。构建模型如下:

$$\ln gml_{it}(\tau) = \alpha_{it}(\tau) + \rho(\tau) W \ln gml_{it} + \sum_{k=1}^n \beta_k \ln X_{k, it} + \varepsilon_{it}(\tau) \quad (4)$$

式中: $\ln gml_{it}$ 为城市 i 第 t 年的水资源绿色效率水平; α_{it} 为截距项或固定效应; W 为空间权重矩阵,本文设定为经济地理距离权重矩阵; $W \ln gml_{it}$ 为水资源绿色效率的空间滞后项; $\rho(\tau)$ 为被解释变量的空间自相关系数,其估计值随分位点 τ 变化而变化; X_{it} 为所有解释变量集合; β_k 为各解释变量的系数; ε_{it} 为模型扰动项。同时,为消除统计数据可能存在的异方差问题,对各变量进行了对数变换。

2.2 指标选取

2.2.1 水资源绿色效率投入产出指标的设定

水资源绿色效率的目标是实现水资源经济效益、社会效益及生态效益共赢。本文基于新古典增长理论和水资源绿色效率内涵,以水资源、劳动力、资本存量为投入要素,以废水排放总量为非期望产出,引入高质量发展指数作为期望产出指标,最终形成长江经济带水资源绿色效率评价指标体系。

(1)投入指标:①水资源投入。选择用水总量作为水资源投入指标,具体为农业用水、工业用水、生活用水、生态用水的总和。②劳动力投入。选用从业人员数来反映劳动力资源的实际投入情况,用上年年末从业人员数与本年年末从业人员数的算术平均值衡量。③资本投入。用资本存量作为资本投入指标,采用“永续盘存法”对物质资本存量进行计算^[25]。

(2)产出指标:①非期望产出指标。已有研究大多选择废水中的 COD 排放量或氨氮排放量来衡量水资源绿色效率的非期望产出,但废水中除这两种污染物外还包括石油类、铅、汞等多种污染物。本文选取长江经济带城市废水排放总量作为非期望产出,以度量水资源使用过程中产生的环境负面效应。②期望产出指标。根据高质量发展内涵和水资源特性^[26],本文在充分梳理、借鉴国内外同类评价指标体系的基础上,不片面追求系统和全面,而是在现有官方统计基础上选取可操作性强的代表

性指标,从“经济社会平衡发展”“人民美好生活需要”以及“生态优先、绿色发展”3个方面着手,通过定基差熵权法生成高质量发展指数,以反映长江经济带水资源绿色效率的期望产出。另外,参考师博等^[27]对地级以上城市高质量发展水平的测度方法,对“经济增长”“社会福利”和“资源环境”3个一级指标进行等权赋值,以凸显高质量发展的多方面均衡性。最终,建立长江经济带水资源高质量发展指标体系如表1所示^①。

2.2.2 水资源绿色效率影响因素

借鉴相关文献,结合长江经济带110个城市发展实际和数据可获取性,将水资源绿色效率作为被解释变量,分别从产业结构、经济发展水平、资源禀赋、科学技术水平、政府管制力度以及对外贸易程度等方面选取解释变量构建模型,探讨影响水资源绿色效率变化的主要因素(表2)。变量选择如下:

(1)产业结构(*str*)。产业结构与水污染排放类型、水资源消耗密切相关,是影响水资源绿色效率的重要因素。产业结构优化进程能够根据资源禀赋和技术水平等外在因素对不合理产业进行动态

调整,使水资源绿色效率得以提高。本文以泰尔指数来具体表征产业结构。

(2)经济发展水平(*rgdp*)。经济发展水平与水资源绿色效率的相关关系在环境库兹涅茨曲线中得到较好印证,即水资源绿色效率随经济发展水平呈现先下降后增长的“U型”关系。人均GDP是衡量经济发展水平的主流指标,本文以人均GDP来量化长江经济带城市经济发展水平。

(3)资源禀赋(*we*)。资源禀赋一般遵循市场价值规律,具体来说,资源禀赋影响资源利用方式和节约意识,从而导致某些资源稀缺地区的利用效率可能高于资源丰富地区。本文用城市人均水资源拥有量来衡量资源禀赋。

(4)科学技术水平(*tec*)。先进的科学技术可以改进工业生产程序,减少工农业废水排放,保障水资源可持续发展和循环利用;而高污染高能耗的落后工艺、技术和设备则会使水资源绿色效率逐步趋于恶化。本文选择科学技术支出占财政支出比重作为科学技术水平的量化指标^②。

(5)政府管制力度(*gi*)。政府在水利政策执行

表1 长江经济带水资源高质量发展指标体系

Table 1 Index system of high-quality development for water resources in the Yangtze River Economic Belt

一级指标	二级指标	三级指标	单位	性质	权重值
经济增长	经济效益	人均GDP	元/人	+	0.19
		GDP增长率	%	+	0.11
	经济结构	第二产业比重	%	+	0.08
		第三产业比重	%	+	0.11
	经济环境	净出口总额占GDP比重	%	+	0.32
		外商直接投资占GDP比重	%	+	0.19
社会福利	医疗卫生水平	医生人数	人	+	0.11
		医院、卫生院床位数	张	+	0.12
	文化教育水平	每万人在校大学生人数	人/万人	+	0.14
		每百人公共图书馆藏书量	册/百人	+	0.17
	收入水平	城镇居民人均可支配收入占人均GDP比重	%	+	0.09
	民生保障水平	排水管道长度	km	+	0.20
		社会保险参保人数	人	+	0.17
	资源环境	资源禀赋	人均水资源量	m³/人	+
环境响应		污水处理率	%	+	0.12
		万元GDP用水量	m³/万元	-	0.41

① 由于篇幅限制,此处未展示定基差熵权法计算公式及过程,如有需要可向作者索取。

② R&D经费投入和技术市场成交额是学术界衡量科学技术水平的两大主流指标。由于本文研究对象时间跨度较长,2009年以前统计年鉴中各市相关指标数据缺失值较多,常见的数据缺失插补方法对实证结果存在较大的主观影响。因此依据研究对象的性质,考虑数据可获得性与数据质量,本文借鉴宋文月等^[28]的研究,采用科学技术支出占财政支出比重来衡量科学技术水平。

表2 影响因素模型变量说明及数据来源

Table 2 Description of driver model variables and data sources

变量类型	变量名称	变量符号	单位	变量说明及其含义	数据来源
被解释变量	水资源绿色效率	<i>gml</i>	无	长江经济带水资源绿色效率	由MaxDEA pro 6.9测算
解释变量	产业结构	<i>str</i>	%	泰尔指数,反映产业结构的合理性;稳健性检验时替换为第二、三产业值占GDP比重	《中国城市统计年鉴》
	经济发展水平	<i>rgdp</i>	元/人	人均GDP,反映地区经济对水资源绿色效率的支撑力度	《中国城市统计年鉴》
	资源禀赋	<i>we</i>	m ³ /人	人均水资源量,反映地区水资源的丰裕程度	各省市水资源公报
	科学技术水平	<i>tec</i>	%	科学技术支出占财政支出比重,反映地区科学技术水平	《中国城市统计年鉴》
	政府管制力度	<i>gi</i>	%	农林水务支出在财政支出中的比重,衡量政府影响力	各省市《统计年鉴》
	对外贸易程度	<i>dft</i>	%	外商直接投资占GDP比重,反映地区对外贸易状况;稳健性检验时替换为单位净出口,即净出口值占GDP的份额	《中国城市统计年鉴》

和水污染治理等方面扮演着重要角色,水利基础设施建设和污水治理支出表明政府对水资源绿色效率提升的重视程度。本文以农林水务支出占财政支出的比重来衡量政府管制力度^③。

(6)对外贸易程度(*dft*)。对外贸易程度可通过提高东道国技术水平和管理水平,使水资源绿色效率得到改善,且激烈的市场竞争会逐步淘汰东道国水资源绿色效率低、污染严重的企业,进而提高水资源绿色效率整体水平。本文用外商直接投资占GDP比重来衡量对外贸易程度。

2.3 数据来源与处理

本文根据2014年《国务院关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》及相关文献对长江经济带行政区域的划分标准,将长江经济带覆盖的上海、浙江、江苏、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州和云南9省2市划分为上、中、下游三大区域^④。另外,由于2011年地市级行政区划的调整,贵州省撤销毕节、铜仁地区设立毕节市、铜仁市2个地级市,而安徽省巢湖市并入合肥市,为保证样本数据的可比性及严谨性,剔除巢湖市这一样本并对毕节、铜仁2市2011年以前年份数据以毕节、铜仁地区数据替代,研究对象最终包含110个城市。本文数据来源于2005—2019年《中国城市统计年鉴》《中国区域统计年鉴》、各省市统计年鉴、历年《中国城

市建设统计年鉴》、水资源公报以及国民经济和社会发展统计公报,缺失数据采用插值法或几何平均法进行补齐。此外,本文运用2004年居民消费价格指数对各个统计数据进行平减,以消除不同城市商品价格对水资源绿色效率的影响,确保评价结果的科学客观。

3 结果与分析

3.1 长江经济带水资源绿色效率的测算结果

3.1.1 长江经济带水资源绿色效率时序演进特征

本文基于超效率EBM模型结合GML生产率指数,借助MaxDEA pro 6.9软件得出长江经济带110个城市的水资源绿色效率,并按长江经济带整体、长江经济带上游、中游和下游4个部分来展开论述。其效率变化趋势如图1所示^⑤。

从长江经济带整体来看,2005—2018年长江经济带水资源绿色效率呈高低交错状的波动上升趋势,除2006年外,效率值均处于0.77~1.13之间,且在2018年达最大值。从阶段性变化特征来看,本文参考张峰等^[29]的研究将长江经济带水资源绿色效率变化划分为3个阶段,即“稳增期”“振落期”和“提速期”。其中,“稳增期”指的是2006—2010年水资源绿色效率呈快速增长趋势。究其原因可能与“十一五”规划中“建设低投入、高产出,低消耗、少排放,能循环、可持续的国民经济体系和资源节约型、环

③ 现有研究大多采用废水治理投资总额占财政支出总额比重和污染治理投资占地方预算百分比来衡量政府管制力度。限于长江经济带城市层面指标数据的可获得性,本文参考丁绪辉等^[19]的研究,采用与其相关性较强的指标——农林水务支出占财政支出的比重进行替代。

④ 在本文中,长江经济带上游地区包括重庆、四川、贵州、云南4省市33个城市;长江经济带中游地区包括江西、湖北、湖南3省份36个城市;长江经济带下游地区包括上海、浙江、江苏、安徽4省市41个城市。

⑤ 鉴于超效率EBM模型结合GML生产率指数测算的水资源绿色效率为环比指数,为方便起见,本文将2004年水资源绿色效率与2005年比值定义为2005年的水资源绿色效率指数,其余年份以此类推。

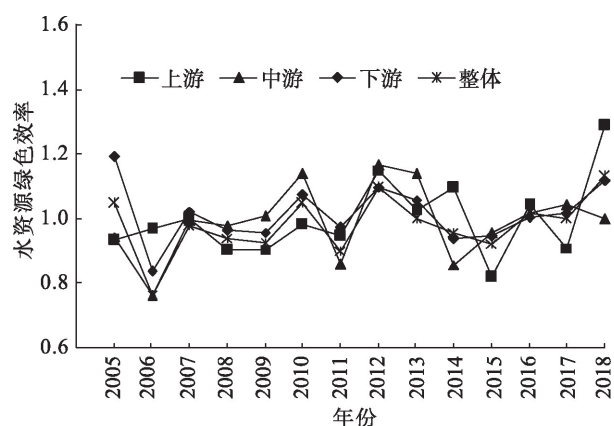


图1 2005—2018年长江经济带水资源绿色效率趋势图

Figure 1 Trend of green efficiency of water resources in the Yangtze River Economic Belt, 2005-2018

境友好型社会”等利好政策紧密关联,水资源绿色效率开始向良性发展,扭转了之前持续下降的局面。2010—2015年为“振落期”,此阶段长江经济带水资源绿色效率除2011年出现明显增幅外,其余年份均表现出相对稳定的下降趋势。其主要原因在于2011年国务院颁布中央1号文件提出实行最严格水资源管理制度,确立用水效率控制红线。各地在限制纳污、推进节水技术改造时造成的经济增速放缓,使水资源绿色效率水平出现下降。同时政府重经济发展规模、轻环境保护观念未根本扭转,亦造成水资源绿色效率的持续走低。2015年后为“提速期”,该阶段长江经济带水资源绿色效率有所好转,并呈持续提升态势,这种变动趋势反映了“共抓大保护、不搞大开发”等政府环境规制政策倒逼作用的效果。

从三大区域划分来看,长江经济带上、中、下游地区水资源绿色效率演化趋势与长江经济带整体效率值基本保持一致(图1)。对研究期间内三大区域水资源绿色效率进行年均计算,发现长江经济带下游地区水资源绿色效率年均值最高(1.01),上游次之(0.99),中游值最低(0.98)。各地区经济基础、产业结构及技术水平等不同导致其水资源绿色效率存在区域差异。长江经济带下游地区经济实力雄厚,技术创新及对外开放程度都处于较高水平,水资源绿色效率也因此处于较高的水平。长江经济带上游地区虽经济实力有限,但污染型产业相对较少,特别是自“西部大开发”战略实施以来,上游地区积极响应绿色发展政策,逐渐重视发展节能环保

保产业,水资源绿色效率改善效果显著。长江经济带中游地区为传统的钢铁、化工、有色金属等老工业基地,生产管理技术落后、工业污染排放过多及环境治理意识薄弱等因素致使其水资源绿色效率较低。

3.1.2 长江经济带水资源绿色效率空间分布特征

(1) 空间分布集聚性特征

为了更直观地分析水资源绿色效率的空间分布情况,通过 ArcGIS 10.5 软件,对研究期间内长江经济带 110 个城市水资源绿色效率进行年均计算,并将测得结果分为低级、中低级、中高级、高级等 4 个等级,绘制水资源绿色效率空间格局分布图(图 2)。结果表明:①长江经济带下游地区是水资源绿色效率高级水平聚集区。其中,无锡市、徐州市、常州市、南通市、泰州市、温州市、金华市等 7 个城市处于前 10 位。江浙沪全省(市)以及皖中地区的 28 个城市水资源绿色效率处于中高级以上水平,占比 59.58%,显示出城市经济发展水平与水资源绿色效率存在正向协同关系。②长江经济带中、上游地区水资源绿色效率在空间分布上具有省会指向性特征。其中,武汉市、重庆市(直辖市在此以省会计)、成都市、贵阳市、昆明市等省会城市水资源绿色效率处在高级水平,南昌市、长沙市及部分省域内次一级城市水资源绿色效率处于中高级水平,如湖北省宜昌市、随州市,江西省景德镇市、萍乡市、新余市,四川省德阳市、绵阳市、眉山市、雅安市、巴中市,贵州省毕节市,云南省玉溪市。这证明经济欠发达的城市通过环境保护、资源优化配置等手段也可提高其水资源绿色效率,与孙才志等^[17]结论相符。③长江经济带水资源绿色效率处于低级水平的城市主要分布于中、上游地区,其中赣中、川东北等地区水资源绿色效率处于低水平,云南省和贵州省除昆明市、贵阳市、毕节市、玉溪市外水资源绿色效率均处于中低、低水平。这些城市受地理区位不佳、产能技术落后、资源消耗量大、污染程度高等因素影响,城市经济社会发展缓慢,生态环境建设不足,整体水资源绿色效率与长江经济带下游地区相比存在较大差距。

(2) 空间分布关联性特征

从全局空间关联性特征来看,2005—2018 年长江经济带水资源绿色效率全局 Moran's I 指数在大

2022年2月

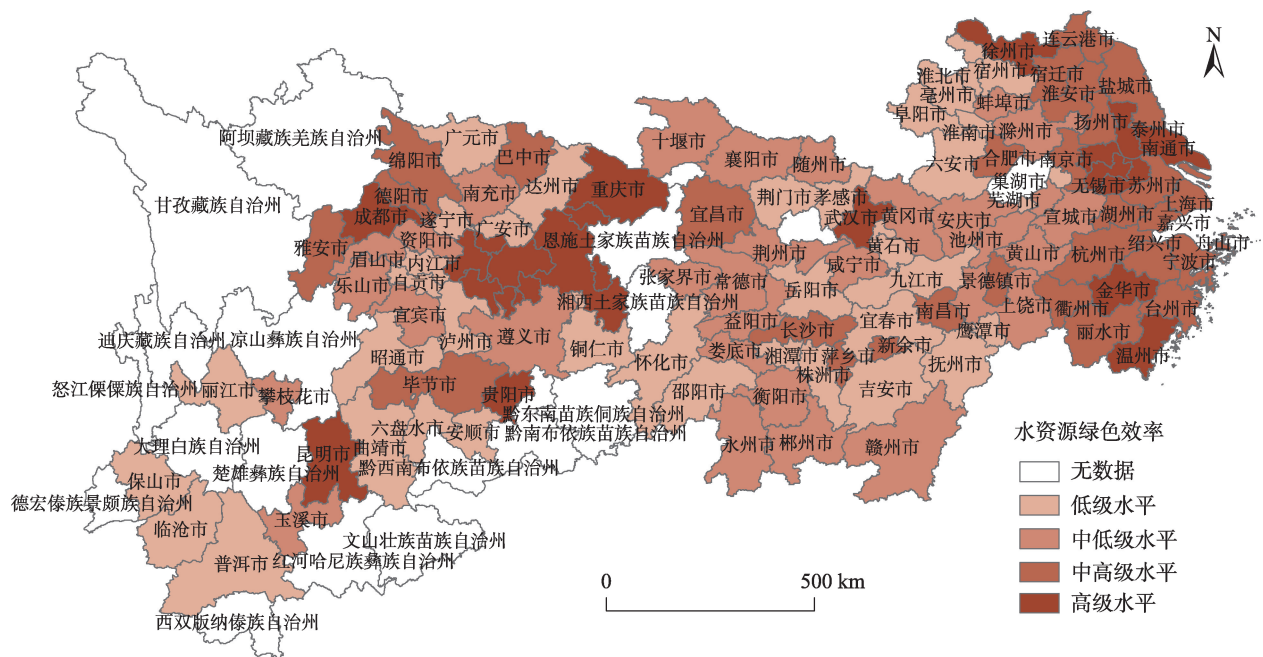


图2 长江经济带110个城市水资源绿色效率空间分布图

Figure 2 Spatial distribution of green efficiency of water resources in 110 cities of the Yangtze River Economic Belt

多数年份均通过了蒙特卡洛模拟检验(表3),说明在10%的显著性水平下,正向空间自相关性是显著的,即水资源绿色效率高的城市和水资源绿色效率低的城市在空间上呈现出集聚特征。同时还发现

水资源绿色效率空间相关性表现出明显的阶段性变化趋势:第一阶段(2005—2009年)水资源绿色效率的Moran's I指数由升转降,且在2009年达到了最低值-0.044;第二阶段(2010—2015年)Moran's I

表3 长江经济带水资源绿色效率全局自相关和局部自相关统计分析表

Table 3 Global self-correlation and local self-related statistical analysis of green efficiency of water resources in the Yangtze River Economic Belt

年份	全局自相关			局部自相关							
	Moran's I	Z	P	高-高		低-高		低-低		高-低	
				数量 ^(a)	占比 ^(b) /%	数量	占比/%	数量	占比/%	数量	占比/%
2005	0.091	1.534	0.074*	8	7.27	3	2.73	7	6.36	1	0.91
2006	0.200	3.336	0.004***	4	3.64	7	6.36	11	10.00	3	2.73
2007	0.095	1.957	0.035**	8	7.27	2	1.82	8	7.27	1	0.91
2008	0.081	2.510	0.015**	4	3.64	1	0.91	7	6.36	3	2.73
2009	-0.044	-0.631	0.266	1	0.91	2	1.82	3	2.73	3	2.73
2010	0.108	1.893	0.033**	4	3.64	4	3.64	6	5.45	6	5.45
2011	0.257	4.257	0.001***	13	11.82	4	3.64	8	7.27	4	3.64
2012	0.037	0.641	0.261	4	3.64	5	4.55	4	3.64	3	2.73
2013	0.170	2.726	0.004***	13	11.82	3	2.73	11	10.00	3	2.73
2014	0.208	3.716	0.002***	8	7.27	3	2.73	4	3.64	4	3.64
2015	0.143	2.402	0.012**	9	8.18	4	3.64	13	11.82	2	1.82
2016	0.003	0.194	0.435	2	1.82	5	4.55	5	4.55	3	2.73
2017	0.249	4.188	0.003***	8	7.27	3	2.73	9	8.18	0	0.00
2018	0.463	7.180	0.001***	14	12.73	1	0.91	18	16.36	1	0.91

注:(a)“数量”为LISA聚类分析中不同类别城市的数量。(b)“占比”为不同类别城市数量在长江经济带110个城市中的占比。*、**、***分别表示10%、5%和1%水平上显著,下同。

指数波动上升,说明了长江经济带水资源绿色效率集聚程度逐步增强;第三阶段(2016—2018年)水资源绿色效率的Moran's I 指数呈大幅上升趋势,这表明了现阶段长江经济带水资源绿色效率空间集聚程度有较大提高。

从局部空间关联性特征来看,长江经济带水资

源绿色效率主要有两种正向空间集聚形式(“高-高”型和“低-低”型),即水资源绿色效率值较高(或较低)的地区在空间上趋向于和周边较高(或较低)的地区相连。此外,通过对比图3中局部空间集聚图可以看出(仅展示2005年和2018年),有集聚特征的城市数量有所增加,其中“高-高”型和“低-低”

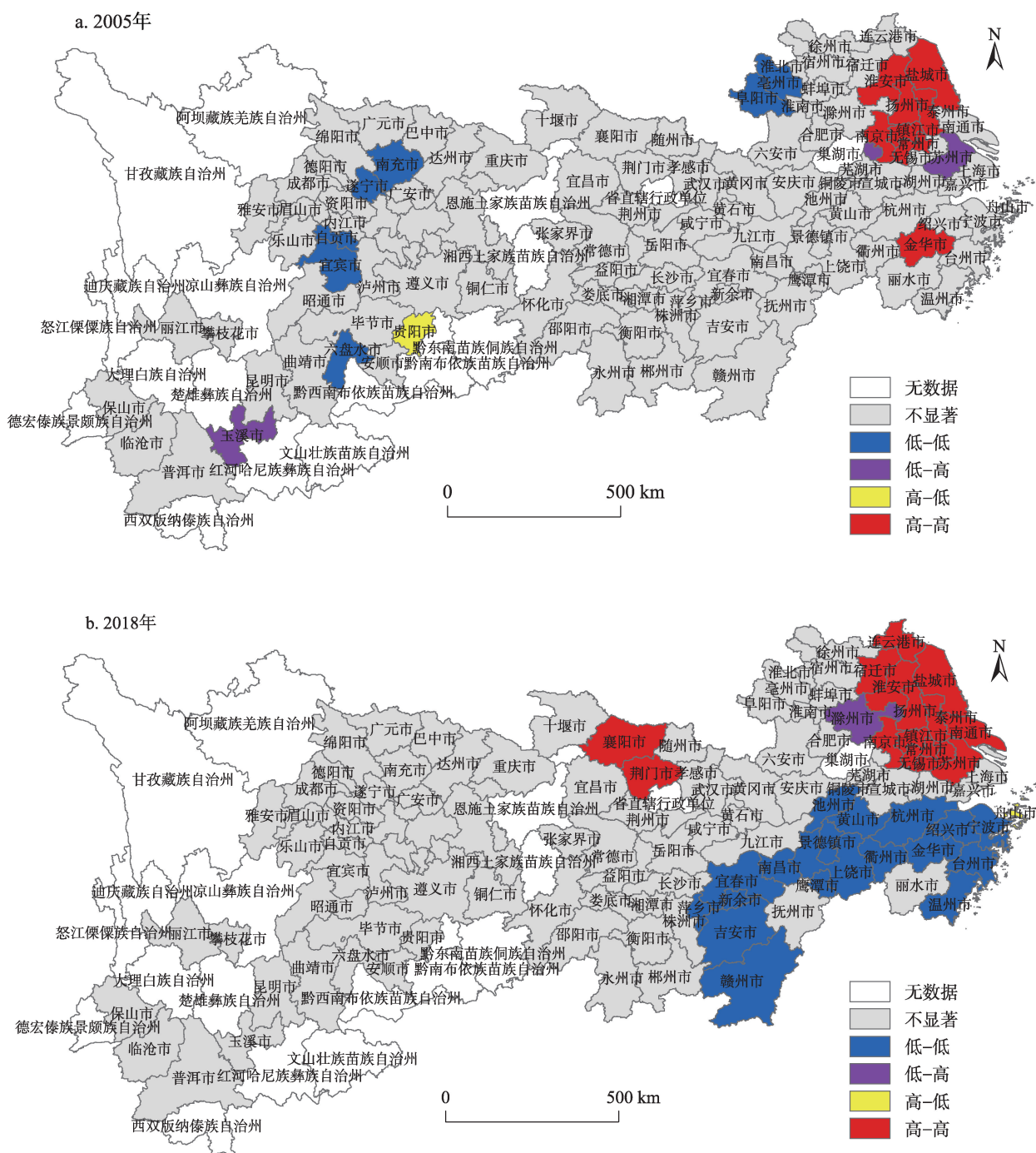


图3 长江经济带水资源绿色效率局部空间集聚图

Figure 3 Local indicators of spatial concentration of green efficiency of water resources in the Yangtze River Economic Belt

2022年2月

型数量在波动中上升,“高-低”型和“低-高”型数量则有先增加后下降趋势。在这4类空间集聚类型中,“高-高”型主要集聚在长江经济带下游地区,且有向长江经济带中游地区扩散的趋势。14年间,南京市、扬州市、常州市、盐城市、淮安市、泰州市、镇江市等7个城市表现出良好的空间连续性和空间集聚特征,在提升自身整体效率的同时带动了周边城市水资源绿色效率的提升,推动了苏州市、连云港市、宿迁市、南通市、无锡市等地区向高效率层次的迈进。“低-低”型主要聚集在产能技术落后、资源消耗大、污染程度以及经济发展水平差异大、资源配置不合理的城市,该区域自身和周边城市的水资源绿色效率均较低,难以形成地区间优势互补,从而导致整个区域水资源绿色效率水平偏低。

3.2 长江经济带水资源绿色效率的影响因素

在对模型参数估计前需进行模型诊断性检验。首先通过空间面板数据 *Hausman* 检验来确定应采取随机效应还是固定效应模型。在本文中, *Hausman* 检验统计值为 25.170,其相对应的 p 值为 0.003,应使用固定效应模型。此外,本文通过 *LM* 检验、*LR* 检验以及 *Wald* 检验来确定空间计量模型选取的合理性。由检验结果可知, *LM-Error* 的 p 统计值为 0.113,说明在 10% 水平上没有通过“无空间自相关”的假设检验;而 *LM-Lag* 的 p 统计值为 0.094,在 10% 水平上拒绝原假设,表明空间滞后模型要优

于空间误差模型。在此基础上,本文通过 *LR* 检验以及 *Wald* 检验来确定空间杜宾模型是否会退化为空间滞后模型,结果表明, *LR* 和 *Wald* 的 p 统计值分别为 0.982 和 0.904,在 10% 显著性水平上不能拒绝原假设,表明了空间杜宾模型会退化成空间滞后模型。故本文最终采用空间滞后面板分位数模型。

水资源绿色效率的滞后项和被解释变量之间存在内生性,这与传统计量模型外生性、同方差的基本假设相违背,此时若采用普通分位数模型进行估计,得到的参数估计将不满足一致性。为避免模型的内生性问题,本文采用 2SLS 估计方法选取解释变量的空间滞后项作为工具变量,通过 *Hansen* 检验判断工具变量的有效性以及过度识别问题。由检验结果可知, *Hansen* 检验值为 4.817,其对应的 p 值为 0.307,不能拒绝“所有工具变量都有效”的原假设,由此可知所选取的工具变量是有效的,且不存在工具变量过度识别问题,模型设定合理。作为对比,在表 4 中同时列出了固定效应模型、面板分位数模型以及空间面板分位数模型估计结果。

3.2.1 空间面板分位数回归结果

由于固定效应模型没有考虑各影响因素对水资源绿色效率影响的异质性,而面板分位数模型虽考虑了异质性问题,却忽略了水资源绿色效率的空间路径依赖特征。因此,下文基于面板分位数回归的空间滞后模型,重点分析影响水资源绿色效率时

表 4 固定效应模型、面板分位数模型及空间面板分位数模型估计结果

Table 4 Fixed effect model, panel quantile model, and spatial panel quantile model estimate results

解释变量	固定效应模型	面板分位数模型					空间面板分位数模型				
		0.10	0.25	0.50	0.75	0.95	0.10	0.25	0.50	0.75	0.95
<i>wlngml</i>							-0.058*** (0.004)	-0.039*** (0.003)	0.002** (0.001)	0.014* (0.007)	0.039*** (0.003)
<i>lnstr</i>	-0.169 (-0.218)	-0.269** (0.010)	0.190** (0.093)	0.036*** (0.004)	0.198* (0.103)	0.264 (0.538)	0.033 (0.050)	0.022 (0.045)	0.108*** (0.020)	0.205 (0.161)	0.317*** (0.027)
<i>lnrgdp</i>	0.081*** (-0.013)	0.055*** (0.001)	0.030*** (0.003)	0.027*** (0.000)	0.057*** (0.004)	0.188*** (0.039)	0.018*** (0.004)	0.018*** (0.001)	0.030*** (0.001)	0.095*** (0.005)	0.069*** (0.003)
<i>lnwe</i>	0.084*** (-0.022)	0.013*** (0.000)	0.023*** (0.002)	0.013*** (0.000)	0.014*** (0.003)	0.031** (0.015)	-0.009*** (0.001)	0.021*** (0.000)	0.014*** (0.000)	0.025*** (0.003)	-0.022*** (0.001)
<i>Intec</i>	0.002 (-0.007)	0.026*** (0.001)	0.013* (0.007)	0.009*** (0.000)	-0.007** (0.003)	-0.020 (0.012)	0.045*** (0.002)	0.034*** (0.001)	0.008*** (0.000)	-0.069*** (0.012)	0.011*** (0.001)
<i>lngi</i>	0.027*** (-0.009)	0.053*** (0.000)	0.023*** (0.002)	0.015*** (0.000)	0.031*** (0.004)	0.020*** (0.007)	0.077*** (0.002)	0.018*** (0.001)	0.018*** (0.000)	0.055*** (0.015)	0.072*** (0.001)
<i>lnfdi</i>	0.016* (-0.008)	0.003*** (0.000)	0.001** (0.001)	0.002*** (0.000)	0.002 (0.001)	0.001 (0.005)	-0.007*** (0.001)	-0.004*** (0.001)	0.004*** (0.000)	0.019*** (0.002)	0.011*** (0.000)

空演变的关键因素。具体结果分析如下:

(1)水资源绿色效率具有明显的空间溢出效应。由水资源绿色效率空间系数的符号和显著性可知,水资源绿色效率大体上存在空间正相关性,即本地水资源绿色效率的增大或减小会使得其相邻城市水资源绿色效率值增大或减小。且其影响程度随分位数增加而增加,在0.95分位点处达最大,表明水资源绿色效率水平高的城市对其邻近城市的正向溢出效用最大。

(2)产业结构调整是促进水资源绿色效率提升的关键因素。产业结构(*str*)在各分位点均对水资源绿色效率产生正向影响,其回归系数随着分位点的增加呈先下降后上升的趋势,即在0.10~0.25分位阶段,产业结构的影响力度小幅下降,而在0.50~0.95分位阶段,产业结构对水资源绿色效率的影响不断提高,说明产业结构对水资源绿色效率低水平城市的调整潜力大于高水平城市。因此,在同等条件下,低效率水平城市可通过产业结构调整来获得比高效率水平城市更多的利益,这与孙才志等^[30]的研究结论相似。

(3)经济发展水平提高是水资源绿色效率提升的首要因素。经济发展水平(*rgdp*)对本地和邻近城市水资源绿色效率具有正向影响,且这种正向影响力度随分位点的上移逐渐增大,表明经济发展对水资源绿色效率处于较高水平的城市溢出效应最大。当水资源绿色效率处于0.10~0.75分位点时,经济发展水平对水资源绿色效率的影响随分位点的增加而增加;当水资源绿色效率处于0.75~0.95分位点时,经济发展水平的作用有所回落,但仍高于0.50分位点。在“共抓大保护、不搞大开发”号召下,长江经济带各地应摒弃早期“追赶式导向”的经济增长模式,追求经济全方位均衡发展,实现经济增长、社会效益的包容性与生态环境绿色化的共赢。

(4)资源禀赋对水资源绿色效率的积极效应较为显著。资源禀赋(*we*)在各分位点均显著影响水资源绿色效率,但影响方向不同。即在0.10和0.95分位点处,资源禀赋负向影响水资源绿色效率;在0.25~0.75分位点处,资源禀赋正向影响水资源绿色效率。以上结果表明长江经济带水资源绿色效率处于中等水平的城市能够合理利用资源,促进水资源绿色效率的提升,这与高孟菲等^[12]的研究结论一

致;而水资源绿色效率处于低水平和高水平的城市可能由于其生活、生产方式和用水理念陷入“资源诅咒”困境。

(5)科学技术可以有效促进水资源绿色效率的提升。科学技术水平(*tec*)对水资源绿色效率的影响大体为正值,其中0.10~0.25分位阶段回归系数明显大于0.50~0.95分位阶段,表明技术进步对水资源绿色效率低水平城市的驱动作用更强。原因可能在于,水资源绿色效率低水平城市科研经费投入的增加对水资源节约及水污染防治的技术创新效应更加显著,从而使得水资源绿色效率得到提升。

(6)政府管制力度的加强是提高水资源绿色效率的重要因素。政府管制力度(*gi*)对长江经济带水资源绿色效率在各分位点均为正向影响,这与汪克亮等^[13]的研究结论存在一定差异,主要由于该研究是采用排污费收入占比表征政府管制力度,与本文衡量指标及切入角度不同。此外,水资源绿色效率的这种正向影响随着分位点的提高呈现出“U型”趋势,即水资源绿色效率在低分位点和高分位点处溢出效应最大,在水资源绿色效率水平中间段时影响程度较小,表明了政策倾斜可大幅提高经济落后及水利基础设施不完善城市的水资源绿色效率;而对于经济实力较为发达、水权意识较明确的城市而言,水权交易市场能更好实现资源的最优配置,使有限的水资源产生较大的效益。

(7)对外贸易程度水平的提高对水资源绿色效率的积极效应较为显著。对外贸易程度(*dft*)对水资源绿色效率的作用由负向影响转为正向影响,其系数符号在0.50分位点处发生了转变,意味着对外贸易程度对水资源绿色效率中等水平以下城市呈负向影响,而对水资源绿色效率中等及以上水平城市呈正向影响。究其原因,“污染天堂”假说在水资源绿色效率低水平地区存在,这些地区经济发展水平相对较低,政府为吸引外资而降低环境标准,进而抑制本地水资源绿色效率的提升。另外,对于水资源绿色效率中等及以上水平城市而言,外商直接投资带来的竞争效应和示范效应等间接促进了水资源绿色效率的提升。

3.2.2 稳健性检验

为确保分析结果及所得结论的可信度,本文拟

2022年2月

表5 稳健性检验的估计结果

Table 5 Estimates of the robustness test

解释变量	空间滞后模型	更换变量的空间面板分位数模型					地理距离权重下的空间面板分位数模型				
		0.10	0.25	0.50	0.75	0.95	0.10	0.25	0.50	0.75	0.95
wlngml	0.161*** (0.021)	-1.820*** (0.032)	-1.962*** (0.020)	0.061** (0.031)	1.627*** (0.228)	3.099*** (0.600)	-1.556*** (0.054)	-1.168*** (0.014)	0.588*** (0.203)	0.336*** (0.100)	1.926*** (0.486)
lnstr	-0.084 (0.338)	-0.170*** (0.005)	0.012*** (0.004)	-0.661*** (0.019)	3.778*** (0.377)	0.066 (0.153)	0.518*** (0.048)	0.024* (0.015)	-0.294*** (0.072)	1.536*** (0.157)	1.077*** (0.162)
lnrgdp	0.115*** (0.037)	0.054*** (0.001)	0.010*** (0.001)	0.098*** (0.002)	-0.378*** (0.045)	0.310*** (0.023)	0.022*** (0.001)	0.014*** (0.000)	-0.167*** (0.026)	0.052*** (0.003)	0.242*** (0.009)
lnwe	0.050*** (0.016)	-0.002*** (0.000)	0.013*** (0.000)	0.006*** (0.000)	0.002** (0.001)	0.040*** (0.007)	-0.001** (0.000)	0.009*** (0.001)	0.104*** (0.012)	0.018*** (0.001)	0.027*** (0.005)
lntec	-0.024*** (0.011)	0.055*** (0.001)	0.036*** (0.000)	0.042*** (0.001)	-0.162*** (0.016)	-0.257*** (0.009)	0.050*** (0.001)	0.042*** (0.001)	0.117*** (0.014)	-0.036*** (0.002)	-0.164*** (0.007)
lngi	0.025*** (0.011)	0.041*** (0.001)	0.036*** (0.000)	0.019*** (0.000)	0.212*** (0.018)	0.161*** (0.006)	0.018*** (0.001)	0.025*** (0.001)	-0.071*** (0.011)	0.026*** (0.001)	0.123*** (0.008)
lnfdi	0.014*** (0.007)	0.001*** (0.000)	0.018*** (0.000)	0.016*** (0.000)	0.340*** (0.032)	0.053*** (0.002)	-0.008*** (0.000)	0.001*** (0.000)	0.016*** (0.002)	0.014*** (0.000)	0.130*** (0.010)

从3个方面进行稳健性检验(表5):①改变计量模型,使用空间滞后模型重新检验各影响因素对水资源绿色效率的影响。据结果可知,空间滞后模型下各解释变量的回归系数和符号与前文大体一致,6个影响因素对水资源绿色效率作用的方向均未发生变化,且回归系数未发生较大波动。②改变自变量度量方式,选择第二、三产业值占GDP比重和单位净出口(定义见表2)分别作为产业结构和对外贸易程度的替代变量重新检验。结果显示,产业结构和对外贸易程度对水资源绿色效率的影响均通过了5%的显著性检验,且回归系数和符号与前文基本一致。③改变空间距离权重矩阵,重新设定基于地理距离的长江经济带城市空间权重矩阵。由表5可知,空间权重矩阵变换对估计结果的影响主要体现在变量的空间效应,而各解释变量对水资源绿色效率的影响趋势没有发生较大变化。该结果没有改变本文主要结论,可认为原模型估计结果稳健。

4 结论与政策启示

4.1 结论

在长江经济带发展战略稳步推进的背景下,水资源绿色效率的空间集聚已然成为区域发展格局的基本态势和重要驱动,基于区域内部发展差异设计水资源绿色效率提升路径也成为不可忽视的现实问题。基于上述问题,本文从高质量发展视角,运用超效率EBM模型和GML生产率指数对长江经

济带110个城市2005—2018年水资源绿色效率进行测度,并通过空间面板分位数模型分析了水资源绿色效率的空间影响因素。研究表明:

(1)从时序演变来看,2005—2018年长江经济带水资源绿色效率总体情况较好,呈增长趋势,先后经历了“稳增期”“振落期”“提速期”3个阶段,目前仍具备较大的提升空间。上、中、下游地区水资源绿色效率存在局部波动,但整体上遵循与长江经济带相一致的变化趋势,同比之下,水资源绿色效率平均值由高到低依次是下游、上游和中游。

(2)从空间格局来看,长江经济带水资源绿色效率呈现明显的空间分异特征,水资源绿色效率较高的城市主要集中在经济发达的中心或副中心城市,数值较低的城市集聚于中、上游不发达城市。长江经济带水资源绿色效率这种空间分布是非随机的,且大致呈发达城市向不发达城市扩散的趋势。由空间自相关检验可知,长江经济带水资源绿色效率呈现“集聚”和“分异”并存的分布格局,且在空间上稳定性程度较高。

(3)就影响因素而言,长江经济带水资源绿色效率存在显著的空间正相关性,即水资源绿色效率会对其存在空间关系的区域产生正向溢出效应。产业结构、经济发展水平、资源禀赋、科学技术水平、政府管制力度以及对外贸易程度对水资源绿色效率均存在显著影响,但作用方向和驱动效果存在

差异。产业结构、经济发展水平、政府管制力度和对外贸易程度对水资源绿色效率处于中等水平以上的城市作用强度较大,而资源禀赋和科学技术水平对水资源绿色效率处于低水平的城市作用强度较大。

4.2 政策启示

长江经济带水资源绿色效率存在显著的空间分异形态,需要因地制宜地制定各地区节水战略和水污染防治策略,成为建设“绿色发展”和“高质量发展”的主战场、生力军。基于以上研究结论,本文提出如下建议:

(1)长江经济带上游地区应优化资源配置,加大研发经费投入。上游地区要充分利用资源优势和生态环境条件,严格把控用水红线、完善水权交易制度和节水减排激励机制,提高水资源的配置和管理能力。此外,上游地区作为经济发展落后区以及水资源绿色效率低值聚集区,在大力发展地区经济的同时还应加大研发经费投入,建立政府研发投入稳定增长机制,鼓励和引导企业、社会加大在水资源开发、节水、污水处理技术等方面的研发资金投入,有效推动水资源与经济社会协调发展。

(2)长江经济带中游地区需在辐射效应下加强政府管制力度,提高科技创新能力。中游地区作为连接上、下游地区的节点,一方面,应着力打破与周边水资源绿色效率高地区之间的溢出壁垒,积极吸收下游地区溢出资金和技术,促进本地水资源绿色效率的提升。另一方面,要全面推进节水减排技术的攻关与推广,重点围绕水环境保护与修复、水资源节约利用等方面深入展开实践,加强水循环信息精准监测与预报技术等关键技术攻关,提高水资源重复利用率。

(3)长江经济带下游地区应打造水资源绿色效率聚集高地,发挥空间外溢效应。对于上海市、江苏省等效率高值区域,要辐射带动周边地区发展。在不断提升自身技术进步的同时优化技术效率,积极学习和借鉴国内外先进的水资源管理经验和手段,对标国内国际先进工艺技术水平,加快调整高耗水行业结构和优化产业布局,为本区域水资源绿色效率的提高注入新的活力,进而发挥对相邻地区的溢出效应,逐步形成水资源绿色效率的高-高集聚空间。

参考文献(References):

- [1] 由沙丘. 我国不同区域城市绿色全要素水资源效率研究[J]. 学术交流, 2016, (6): 173-176. [You S Q. Study on the green total factor efficiency of water resources in different regional cities in China [J]. Academic Exchange, 2016, (6): 173-176.]
- [2] Yao X, Feng W, Zhang X L, et al. Measurement and decomposition of industrial green total factor water efficiency in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 1144-1156.
- [3] Jin W, Zhang H Q, Liu S S, et al. Technological innovation, environmental regulation, and green total factor efficiency of industrial water resources[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 61-69.
- [4] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 1999-2011. [Sun C Z, Jiang K, Zhao L S. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32 (12): 1999-2011.]
- [5] 杨高升, 谢秋皓. 长江经济带绿色水资源效率时空分异研究: 基于SE-SBM与ML指数法[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 349-358. [Yang G S, Xie Q H. Study on spatial and temporal differentiation of green water resources efficiency in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2): 349-358.]
- [6] 潘忠文, 徐承红. 我国绿色水资源效率测度及其与经济增长的脱钩分析[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2020, (4): 1-9. [Pan Z W, Xu C H. The measurement of green water resources efficiency in China and its decoupling from economic growth[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2020, (4): 1-9.]
- [7] 李俊鹏, 郑冯忆, 冯中朝. 基于公共产品视角的水资源利用效率提升路径研究[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 98-112. [Li J P, Zheng F Y, Feng Z C. Study on the improvement path of water resource utilization efficiency from the perspective of public products[J]. Resources Science, 2019, 41(1): 98-112.]
- [8] 徐承红, 潘忠文. 区域绿色水资源效率提升的门槛效应: 基于异质性环境规制的视角[J]. 吉林大学社会科学学报, 2019, 59(6): 83-94. [Xu C H, Pan Z W. Threshold effect of regional green water resource efficiency improvement: In the perspective of heterogeneous environmental regulation[J]. Jilin University Journal Social Sciences Edition, 2019, 59(6): 83-94.]
- [9] 赵良仕, 冷明祥. 辽宁省全要素水资源绿色效率测算与提升路径分析: 基于DEA-Tobit模型[J]. 资源开发与市场, 2020, 36(5): 456-461. [Zhao L S, Leng M X. Total factor water green efficiency measurement and promotion path analysis of Liaoning Province: Based on DEA-Tobit model[J]. Resource Development & Market, 2020, 36(5): 456-461.]
- [10] Guo Y R, Hu Y, Shi K, et al. Valuation of water resource green efficiency based on SBM-Tobit panel model: Case study from Henan Province, China[J]. Sustainability, 2020, 12(17): 6944-6960.

2022年2月

- [11] 张峰, 薛惠锋. 基于绿色发展的工业全要素水资源效率时空特征[J]. 资源科学, 2021, 43(5): 964-973. [Zhang F, Xue H F. Spatio-temporal characteristics of industrial total factor water resource efficiency based on green development[J]. Resources Science, 2021, 43(5): 964-973.]
- [12] 高孟菲, 于浩, 郑晶. 黄河流域绿色水资源效率及空间驱动因素研究[J]. 生态经济, 2020, 36(7): 44-50. [Gao M F, Yu H, Zheng J. Study on green water resources efficiency and spatial driving factors in the Yellow River Basin[J]. Ecological Economy, 2020, 36(7): 44-50.]
- [13] 汪克亮, 刘悦, 史利娟, 等. 长江经济带工业绿色水资源效率的时空分异与影响因素: 基于EBM-Tobit模型的两阶段分析[J]. 资源科学, 2017, 39(8): 1522-1534. [Wang K L, Liu Y, Shi L J, et al. Yangtze River Economic Zone spatial and temporal disparities in industrial green water resource efficiency and influencing factors: Based on two-step analysis of EBM-Tobit Model[J]. Resources Science, 2017, 39(8): 1522-1534.]
- [14] 张伟, 刘宇. 长江经济带绿色水资源利用效率评价: 基于EBM模型[J]. 华东经济管理, 2018, 32(3): 67-73. [Zhang W, Liu Y. Evaluation on utilization efficiency of green water resources in the Yangtze River Economic Zone: Based on EBM model[J]. East China Economic Management, 2018, 32(3): 67-73.]
- [15] 巩灿娟, 徐成龙, 张晓青. 黄河中下游沿线城市水资源利用效率的时空演变及影响因素[J]. 地理科学, 2020, 40(11): 1930-1939. [Gong C J, Xu C L, Zhang X Q. Spatio-temporal evolution and influencing factors of water resources utilization efficiency of cities along the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(11): 1930-1939.]
- [16] 王保乾, 谢贝. 工业绿色水资源效率动态演进与空间溢出效应研究: 以长江经济带为例[J]. 资源与产业, 2020, 22(5): 10-18. [Wang B Q, Xie B. Dynamic evolution and spatial spillover effect of industrial green water resource efficiency: Based on a case study of Yangtze River Economic Zone[J]. Resources & Industries, 2020, 22(5): 10-18.]
- [17] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于GWR模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1022-1035. [Sun C Z, Ma Q F, Zhao L S. Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1022-1035.]
- [18] 岳立, 任婉瑜, 姚小强. 黄河流域城市绿色水资源效率时空变化及其影响因素: 基于河流生态水文分区的视角[J]. 工业技术经济, 2021, 40(10): 15-22. [Yue L, Ren W Y, Yao X Q. Spatiotemporal change of urban green water resources efficiency and its influencing factors in the Yellow River Basin: Based on the perspective of river eco hydrological regionalization[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2021, 40(10): 15-22.]
- [19] 丁绪辉, 贺菊花, 王柳元. 考虑非合意产出的省际水资源利用效率及驱动因素研究: 基于SE-SBM与Tobit模型的考察[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1): 157-164. [Ding X H, He J H, Wang L Y. Inter-provincial water resources utilization efficiency and its driving factors considering undesirable outputs: Based on SE-SBM and Tobit model[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(1): 157-164.]
- [20] Tone K, Tsutsui M. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(3): 1554-1563.
- [21] Andersen P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1993, 39(10): 1261-1265.
- [22] 李坤明, 方丽婷. 空间滞后分位数回归模型的工具变量估计及参数检验[J]. 统计研究, 2018, 35(10): 103-115. [Li K M, Fang L T. Instrumental variables estimation and parametric tests of spatial lag quantile regression model[J]. Statistical Research, 2018, 35(10): 103-115.]
- [23] 方丽婷, 李坤明. 空间滞后分位数回归模型的贝叶斯估计[J]. 数量经济技术经济研究, 2019, 36(9): 102-116. [Fang L T, Li K M. Bayesian estimation of spatial lag quantile regression model[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2019, 36(9): 102-116.]
- [24] 王周伟, 赵启程, 李方方. 地方政府债务风险价值估算及其空间效应分解应用[J]. 中国软科学, 2019, 34(12): 81-95. [Wang Z W, Zhao Q C, Li F F. Local government debt value at risk estimation and application of spatial effect decomposition[J]. China Soft Science, 2019, 34(12): 81-95.]
- [25] 吴延瑞. 生产率对中国经济增长的贡献: 新的估计[J]. 经济学(季刊), 2008, 8(3): 827-842. [Wu Y R. The role of productivity in China's growth: New estimates[J]. China Economic Quarterly, 2008, 8(3): 827-842.]
- [26] 李金昌, 史龙梅, 徐嵩婷. 高质量发展评价指标体系探讨[J]. 统计研究, 2019, 36(1): 4-14. [Li J C, Shi L M, Xu A T. Probe into the assessment indicator system on high-quality development[J]. Statistical Research, 2019, 36(1): 4-14.]
- [27] 师博, 张冰瑶. 全国地级以上城市经济高质量发展测度与分析[J]. 社会科学研究, 2019, (3): 19-27. [Shi B, Zhang B Y. High quality development measurement and analysis of national prefecture-level city[J]. Social Science Research, 2019, (3): 19-27.]
- [28] 宋文月, 任保平. 中国省域创新驱动发展水平评价及其影响因素分析[J]. 统计与信息论坛, 2019, 34(1): 73-82. [Song W Y, Ren B P. Evaluation of innovation driven ability and its influencing factors analysis in China's provincial regions[J]. Statistics and Information Forum, 2019, 34(1): 73-82.]
- [29] 张峰, 王晗, 薛惠锋. 工业绿色全要素水资源效率的空间格局特征[J]. 软科学, 2020, 34(10): 43-49. [Zhang F, Wang H, Xue H F. Spatial pattern characteristics of industrial green total factor water resources efficiency[J]. Soft Science, 2020, 34(10): 43-49.]
- [30] 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 C Z, Ma Q F, Zhao L S. Green efficiency changes for water resources in China based on SBM-Malmquist model[J]. Resources Science, 2018, 40(5): 993-1005.]

Spatiotemporal pattern and influencing factors of green efficiency of water resources in the Yangtze River Economic Belt

DENG Qizhong, ZHANG Ling

(School of Business, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The Yangtze River Economic Belt is an important water resources gathering area and water ecological functional area in China, and its green efficiency of water resources directly affects the quality and the stability of the ecosystem. From the perspective of high-quality development, this paper reconstructs the green efficiency evaluation index system of water resources in the Yangtze River Economic Belt. Then, we measure and identify the characteristics of the spatiotemporal pattern and influencing factors of the green efficiency of water resources by using the method of fixed base range entropy weight, the super-efficiency EBM model, GML productivity index and the quantitative regression of spatial panel data model. The results shows that: (1) From the evolution of time sequence, the overall green efficiency of water resources in the Yangtze River Economic Belt from 2005 to 2018 shows a fluctuant upward tendency taken on the high and low staggered form, which successively experiences three stages: “steady increase period”, “vibration period”, and “speed-up period”. (2) From the perspective of spatial pattern, the spatial difference of green efficiency of water resources in the Yangtze River Economic Belt is remarkable. The area with higher green efficiency of water resources are mainly economically developed central or sub-central cities, as the cities with low level gathers in the middle reaches and upstream underdeveloped regions, which shows the sign of proliferation from high to low. And there is a positive autocorrelation in global spatial testing. Meanwhile, the agglomeration phenomenon and spillover effect are been discovered in the local space. (3) From the perspective of driving factors, industrial structure, economic development level, resources endowment, science and technology level, government regulation and the degree of foreign trade all have a significant impact on the green efficiency of water resources. However, for the green efficiency of water resources at different quantiles, the driving factors have different effect on directions and strengths, which is still valid after a series of robustness tests. Finally, according to the trend and law of spatial and temporal of the green efficiency of water resources in the Yangtze River Economic Belt, the relevant policy recommendations are put forward.

Key words: Yangtze River Economic Belt; green efficiency of water resources; high-quality development; spatiotemporal evolution; influencing factor; super-efficiency EBM model; quantile regression for spatial panel data model