

引用本文: 许晶荣, 黄德春, 方隽敏. 中国区域全要素水资源利用效率及其影响[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2021, 23(6): 77-84.

DOI: 10.3876/j.issn.1671-4970.2021.06.011

中国区域全要素水资源利用效率及其影响

许晶荣^{1,2,3,4}, 黄德春^{1,3,4}, 方隽敏^{1,3,4}

(1. 河海大学商学院, 江苏南京 211100; 2. 江苏第二师范学院商学院, 江苏南京 210013;
3. 河海大学产业经济研究所, 江苏南京 211100; 4. 河海大学世界水谷研究院, 江苏南京 211100)

摘 要: 在深入践行“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路下, 科学有效地评估我国区域全要素水资源利用效率, 对于完善当前治水水平具有重要的意义。基于全要素分析框架, 将水足迹纳入投入产出指标体系, 构建 Shephard 水资源距离函数, 结合 SFA 模型测度了我国 2003—2018 年全要素水资源利用效率, 结果表明: 我国水足迹总量呈波动上升趋势, 在 2010 年后增长趋势逐渐放缓, 区域间水足迹平均值和年均增长率存在显著差异; 我国全要素水资源利用效率不高, 具有东高西低特征, 全国及东、中、西部均呈下降—上升—下降—上升的 W 形变化趋势, 呈现从西北向东南地区逐步提升趋势; 环境规制与全要素水资源利用效率呈现 U 形关系, 经济发展水平、技术水平、贸易结构、产业结构以及用水结构对我国全要素水资源利用效率具有正向促进作用, 城镇化则具有负向促进作用。最后根据研究结果提出相关政策建议。

关键词: 全要素水资源利用效率; 水足迹; Shephard 距离函数

中图分类号: F062.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-4970(2021)06-0077-08

当前, 在水资源短缺和水污染问题的双重压力下, 全世界正面临着严重的水资源危机。目前, 全世界有 1/6 的人口处于缺水, 到 2025 年世界缺水人口将超过 25 亿。我国更是世界上最严重缺水的国家之一, 面临着水多、水少、水浑、水脏等突出问题, 据统计我国水资源总量约 2.8 万亿 m^3 , 但人均水资源占有量却不足世界水平的 1/3, 近 2/3 城市面临着不同程度缺水问题。改革开放以来, 我国经济经

过 40 多年的高速发展, 但与之相伴的是“高投入、高消耗、低效率”的粗放式发展, 社会经济发展与水资源以及水环境的矛盾不断加剧, 水资源供需失衡进一步凸显。破解我国水资源供需失衡的关键是要提高我国水资源利用效率。因此客观评价我国区域水资源利用效率, 明确水资源利用效率的驱动因素, 对于提升我国区域水资源利用效率具有重要的现实意义。鉴于此, 本文基于全要素分析框架, 将反映实

收稿日期: 2021-05-10

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(19ZDA084); 江苏省研究生科研创新计划(KYCX18_0511); 河海大学中央高校基本科研业务费专项(2018B709X14)

作者简介: 许晶荣(1989—), 男, 江苏南通人, 讲师, 博士, 从事水资源管理研究。

际水资源消耗的水足迹作为投入指标,对我国水资源利用效率进行测算,并详细讨论其影响因素,为提升水资源利用效率的针对性以及合理界定各省市水资源利用提供科学参考。

一、文献综述

为了反映凝结在产品或服务中的水资源真实消费量,英国学者 Allan 在 1993 年提出虚拟水的概念^[1],将水资源分为实体水和虚拟水。在此基础上,Hoekstra 借鉴生态足迹的概念,将水足迹定义为包含直接和间接用水的所有水资源利用量,而地区水足迹表示某地区最终需求所消耗的所有水资源量^[2]。基于水足迹的研究已成为水资源投入产出研究的热点,涉及多个角度。一是对单一地区或特定行业的水足迹进行核算和结构分析等。目前众多学者从国家、省级以及城市层面核算了水足迹^[3-6],并分析了其结构特征。此外,部分学者试图找出水足迹格局变迁的驱动力。Sun 等指出水资源禀赋、经济水平、实际用水量、用水效率和区域差异是导致各省水足迹格局变迁的驱动因素^[7]。Fan 等基于投入产出和结构分解模型指出水资源利用效率会抑制水足迹的增加,而人均 GDP 对其增长贡献很大^[8]。孙才志等研究发现工业化、信息化、城镇化以及农业现代化对我国水足迹强度改善具有积极影响^[9]。

近年来,水资源利用效率越来越受到学术研究者们的关注,相关研究主要聚焦于采用不同方法测度其效率及其影响因素分析。SFA 和 DEA 作为衡量决策单元相对效率的常规方法,在水资源利用效率评价中得到了广泛的应用。Hu 等首次将传统的径向 DEA 方法应用于我国省级全要素水资源效率评价,定义了全要素水资源利用效率^[10]。目前,全要素分析框架已被广泛应用于测算水资源利用效率。Wang 等采用随机前沿分析模型对我国农业用水效率进行测度^[11]。常规的 DEA 和 SFA 分析并未考虑污染对水资源利用效率的影响,所测算结果并不能真正反映我国水资源利用效率,也不能反映绿色发展下我国水资源管理成效。张兆方等^[12]、Yao 等^[13]、Zhou 等^[14]均采用不同 DEA 模型,在考虑环境污染下测度我国水资源利用效率。孙才志等基于水足迹理论,将灰水足迹作为非期望产出,纳入投入产出指标体系,测度我国水资源绿色效率^[15]。此

外,一些学者还试图找出影响全要素水资源利用效率的影响因素。学者们采用不同方法研究发现经济发展、技术进步、区域差异等对水资源利用效率产生了显著的影响^[16-18]。

从上述文献来看,目前从水资源消耗视角,探讨全要素水资源利用效率的文献相对较少。此外,现有的研究方法仅仅是将水资源纳入原有的投入产出框架中,实现资本、劳动力以及水资源的同比例变化,而这与现实情况不符。因为,各省份的资本和劳动力在短期内不会产生大幅度变化,而我国当前的生产现实是以建设节水型社会为基础。因此,可以利用 Shephard 投入型距离函数构造只寻求减少水资源投入的效率测度模型更贴近当前我国现实。基于此,本文将水足迹纳入投入产出指标体系,引入 Shephard 水资源距离函数,将水资源利用效率影响因素纳入分析框架,采用 SFA 模型对我国区域水资源利用效率进行估计,提出了一种在全要素框架下水资源利用效率新的测算方法。

二、研究方法

1. 水足迹模型

自 Hoekstra 提出水足迹模型以来^[2],关于水足迹的核算一直是众多学者关注的焦点,其核算方法如下:

$$W_{WFP} = I_{WFP} + E_{WFP} \tag{1}$$

其中 $I_{WFP} = A_{WU} + I_{WU} + D_{WU} + E_{WU} - V_{WU}$

$$E_{WFP} = V_{WI} - V_{WE}$$

式中: W_{WFP} 为某一区域内总的水足迹; I_{WFP} 为某一区域消费的内部水足迹; E_{WFP} 为某一区域消费的外部水资源总量,通常用进出口贸易虚拟水表示; A_{WU} 为农业虚拟水量; I_{WU} 为工业用水总量; D_{WU} 为生活用水总量; E_{WU} 为生态环境用水总量; V_{WU} 为出口虚拟水量; V_{WI} 为进口虚拟水量; V_{WE} 为某地区进口商品再出口包含的虚拟水量,一般忽略不计。

2. Shephard 水资源距离函数

距离函数是测定实际产出与生产技术集前沿面之间的相对距离,因此,在定义距离函数之前首先要确定生产技术集,假设在一个经济体存在 Q 个决策单元(DMU),每一个 DMU 投入 $n(n=1,2,\cdots,N)$ 个要素 x_n ,能够生产出 $m(m=1,2,\cdots,M)$ 种产品 y_m ,则生产技术集可以定义为

$$S(\mathbf{x}) = \{\mathbf{y}; \mathbf{x}\} \quad (2)$$

式中: $S(\mathbf{x})$ 为在一定的生产技术条件下, 单位投入量所能产生的所有产出的集合; $\mathbf{y}$ 为产出的集合向量, $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_M)$; $\mathbf{x}$ 为投入的集合向量, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 。

参考 Zhou 等^[19] 和邢贞成等^[20] 构建 Shephard 能源距离和 Shephard 生态距离的思路, 将 Shephard 水资源距离函数定义为

$$D_e(K, L, W, Y) = \sup \{ \beta : (K, L, W_{\text{WFP}}/\beta, Y) \in S(K, L, W) \} \quad (3)$$

式中: $D_e(K, L, W_{\text{WFP}}, Y)$ 为距离函数, 表示保持产出不变; K 为资本投入; L 为劳动力投入; W 为水资源投入; Y 为产出; β 为水资源投入的最大收缩比。

Yao 等将全要素水资源利用效率定义为最优的水资源投入与实际水资源投入的比值^[13], 结合上文 Shephard 水资源距离函数的定义, 全要素水资源利用效率 F_{WFP} 可以用 Shephard 水资源距离表示为

$$F_{\text{WFP}} = \frac{W_{\text{WFP}}/D_e(K, L, W_{\text{WFP}}, Y)}{W_{\text{WFP}}} = \frac{1}{D_e(K, L, W_{\text{WFP}}, Y)} \quad (4)$$

3. Shephard 水资源距离函数的 SFA 模型

参考 Du 等的研究方法^[21], 利用超越对数形式生产函数对 Shephard 水资源距离进行估计, 经过简单推导, 得到 Shephard 水资源距离的 SFA 模型一般形式:

$$\begin{aligned} \ln(1/W_{it}) = & \beta_0 + \beta_k \ln K_{it} + \beta_l \ln L_{it} + \beta_y \ln Y_{it} + \\ & \beta_{kk} (\ln K_{it})^2 + \beta_{ll} (\ln L_{it})^2 + \beta_{yy} (\ln Y_{it})^2 + \\ & \beta_{kl} \ln K_{it} \ln L_{it} + \beta_{ky} \ln K_{it} \ln Y_{it} + \beta_{ly} \ln L_{it} \ln Y_{it} + \\ & \beta_{it} t + \beta_{it} t^2 + \beta_{kit} t \ln K_{it} + \beta_{lit} t \ln L_{it} + \\ & \beta_{yit} t \ln Y_{it} + v_{it} - u_{it} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: t 为时间; i 为各省份; K_{it} 、 L_{it} 、 W_{it} 分别为 t 时间 i 省份的资本投入、劳动力投入和水资源投入量; Y_{it} 为 t 时间 i 省份的产出; β_0 、 β_k 、 β_l 、 β_y 、 β_{kk} 、 β_{ll} 、 β_{yy} 、 β_{kl} 、 β_{ky} 、 β_{ly} 、 β_{it} 、 $\beta_{it} t$ 、 β_{kit} 、 β_{lit} 、 β_{yit} 为待估计参数; v_{it} 为随机误差项, 表示不可控的外部影响因素和测量误差, 服从相互独立的正态分布 $N(0, \sigma_v^2)$; u_{it} 为非负的技术无效率项, $u_{it} = \ln D_e(K_{it}, L_{it}, W_{it}, Y_{it})$ 。

结合式(4)得到全要素水资源利用效率为

$$F_{W_{it}} = \exp(-u_{it}) \quad (6)$$

其中

$$u_{it} = \delta_0 + \sum_p z_{it}^p \delta_p$$

式中: u_{it} 服从相互独立的截尾正态分布 $N(u_{it},$

$\sigma_{2_u}^2)$; z_{it}^p 为从技术无效率项中分离出来的影响产出变化的影响因素; δ_0 为常数项; δ_p 为各影响因素待估计参数。

三、变量设计与数据来源

1. 投入产出指标

投入产出指标的选择对于测度中国区域全要素水资源利用效率至关重要。研究的投入指标分别为水资源投入、资本投入、劳动力投入, 产出指标为 GDP, 具体如下:

(1) 水资源投入指标

使用“水足迹”作为水资源投入指标, 综合孙付华^[22]、孙才志等的研究方法^[23], 通过农业水足迹、工业水足迹、生活水足迹、生态水足迹、进口虚拟水量以及出口虚拟水量折算得到。

(2) 资本投入指标

以资本存量作为资本投入指标的代理变量, 采取永续盘存法对资本存量进行相关估计, 并将其转化为 2003 年不变价格。

(3) 劳动力投入指标

选取各省份年末从业人员数量作为劳动力投入指标。

(4) 产出指标

选取 GDP 作为产出指标, 为减少价格变动造成的影响, 以 2000 年为基期, 采用 GDP 平减指数法将历年 GDP 转化为 2000 年不变价格。

2. 影响因素变量指标

提高全要素水资源利用效率是经济持续高质量增长的关键, 探讨影响水资源利用效率的因素是提升全要素水资源利用效率的关键, 可以直接促进我国各地区经济的可持续发展, 影响一个地区全要素水资源利用效率的因素众多。基于上文文献分析可以发现, 主要包括了经济因素、结构因素以及技术因素等原则。因此, 参考文献[18-20]选取区域经济水平差异等为全要素水资源利用效率差异影响因素的代理变量, 如表 1 所示。

3. 数据来源

本文所使用的原始数据来源于 2004—2019 年《中国统计年鉴》以及各省份 2004—2019 年统计年鉴, 由于西藏部分数据缺失, 研究选取了其他省市作为研究对象。其中由于缺少 2018 年工业污染治理完成投资额, 通过插值法补充当年数据。

表 1 全要素水资源利用效率差异影响因素的定义和说明

变量名	变量定义
区域经济水平差异 (EL)	人均 GDP
产业结构 (IS)	第三产业增加值/GDP
用水结构 (WS)	工业用水/供水总量比重
技术进步水平 (TL)	研发强度
资源禀赋水平 (WE)	人均水资源量
贸易结构 (TS)	出口总额/进出口总额
外资规模 (FIS)	FDI/全社会固定资产投资
环境规制水平 (ER)	工业污染治理完成投资额/工业生产总产值
城镇化水平 (CP)	城市人口规模占总人口数量

四、实证分析

1. 中国水足迹测度结果

根据上文水足迹模型,本文计算了中国 2003—2018 年 30 个省份的水足迹,计算结果表明我国大部分省份水足迹呈波动上升趋势^①。从水足迹组成结构来看,农业水足迹占比最大,平均为 89.95%,其次是工业水足迹占比,平均为 6.93%,生态水足迹占比最小,平均占比不到 1%。图 1 清晰表明了 2003—2018 年我国国家层面的水足迹使用总量和

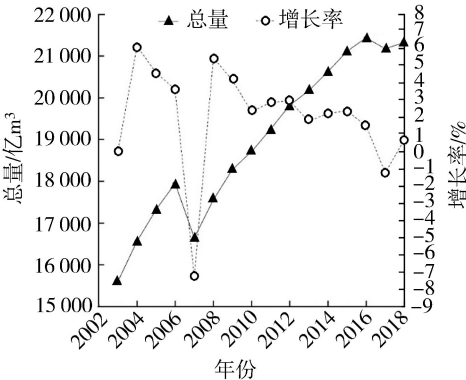


图 1 2003—2018 年中国水足迹总量和增长率趋势

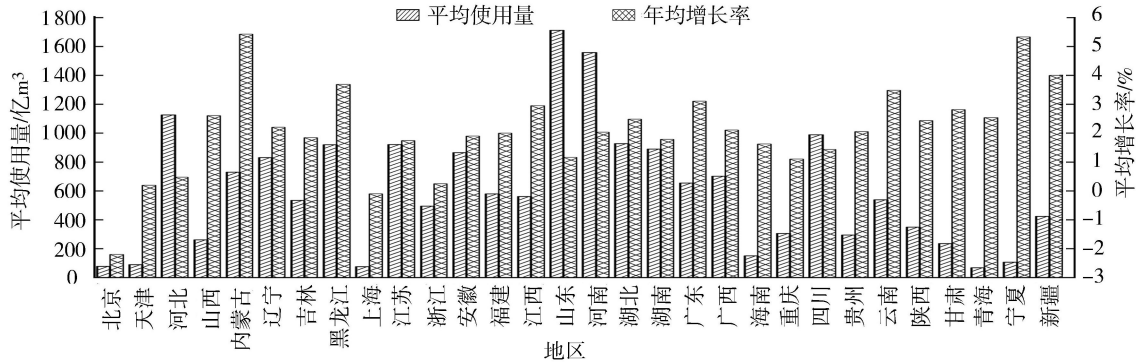


图 2 中国各省市水足迹平均使用量和年均增长率

增长率变化趋势。从国家层面来看,我国水足迹总量呈波动上升趋势,由 2003 年的 15 602 亿 m^3 增长至 2018 年的 21 328 亿 m^3 ,总体增长率为 36.67%。在 2007 年和 2017 年这 2 年较上年度略有下降,相对而言 2007 年我国水足迹总量下降趋势更为明显,可能的原因是,2007 年,我国气候异常,31 个省市都遭受了不同程度水旱和洪涝灾害,造成了农产品产量严重下降。从增长率来看,我国年增长率呈现波动变化中,在 2010 年之前增长率相对较大,总体保持在 4% ~ 6.14%,在 2010 年之后增长幅度相对放缓,总体保持在 0.7% ~ 2.95%,这主要得益于国家对水资源使用的最严格控制。

图 2 反映了我国省市层面的水足迹使用现状,2003—2018 年山东省水足迹平均使用量最大,达到了 1 801.43 亿 m^3 ,青海省水足迹平均使用量最小,仅为 71.97 亿 m^3 。2003—2018 年内蒙古水足迹年均增长率最高,为 5.43%。北京和上海水足迹年均增长率为负,分别为 -2.2% 和 -0.1%,表明北京和上海的水足迹整体呈下降趋势,可能的原因是北京和上海在我国特殊地位,随着产业结构的不断优化,农业在北京和上海的产业中所占比例越来越小,而前文分析发现农业在水足迹总量构成中占据绝对位置。

2. 中国全要素水资源利用效率测度结果

运用 frontier4.1 软件对式(7)进行估计,得到我国各省份全要素水资源利用效率,结果如表 2 所示。

从单个省份、直辖市以及自治区来看,在样本期内,北京、上海全要素水资源利用效率相对较高,平均全要素水资源利用效率能够达到 0.95 以上,同时只有北京(2009—2018 年)和上海(2012—2018 年)的全要素水资源利用效率在部分年份能够达到最优

① 篇幅所限,具体结果未展示,如有需要,可向作者索取。

表 2 2003—2018 年中国区域全要素水资源
利用效率测度结果^①

地区	2003 年	2007 年	2011 年	2015 年	2018 年	均值
北京	0.988	0.996	1.000	1.000	1.000	0.997
天津	0.655	0.582	0.773	0.973	0.973	0.765
河北	0.490	0.479	0.467	0.622	0.695	0.523
山西	0.453	0.493	0.475	0.720	0.711	0.563
内蒙古	0.188	0.238	0.295	0.374	0.429	0.297
辽宁	0.518	0.499	0.531	0.589	0.778	0.566
吉林	0.361	0.394	0.353	0.437	0.456	0.397
黑龙江	0.323	0.392	0.383	0.470	0.415	0.411
上海	0.797	0.936	0.995	1.000	1.000	0.953
江苏	0.632	0.753	0.903	0.992	0.995	0.867
浙江	0.516	0.730	0.883	0.988	0.995	0.829
安徽	0.638	0.665	0.625	0.854	0.959	0.725
福建	0.538	0.589	0.669	0.729	0.899	0.659
江西	0.510	0.464	0.481	0.597	0.731	0.535
山东	0.459	0.517	0.726	0.928	0.911	0.689
河南	0.560	0.522	0.579	0.747	0.848	0.614
湖北	0.543	0.694	0.723	0.834	0.952	0.725
湖南	0.578	0.576	0.687	0.792	0.978	0.696
广东	0.480	0.605	0.837	0.985	0.994	0.772
广西	0.475	0.358	0.377	0.372	0.459	0.395
海南	0.184	0.188	0.252	0.337	0.372	0.261
重庆	0.548	0.606	0.612	0.864	0.982	0.704
四川	0.996	0.753	0.686	0.895	0.936	0.818
贵州	0.585	0.649	0.692	0.566	0.632	0.635
云南	0.485	0.510	0.559	0.597	0.609	0.542
陕西	0.952	0.729	0.621	0.746	0.785	0.742
甘肃	0.691	0.572	0.483	0.728	0.666	0.605
青海	0.429	0.331	0.324	0.341	0.403	0.354
宁夏	0.375	0.426	0.428	0.469	0.587	0.434
新疆	0.225	0.272	0.314	0.414	0.405	0.333
全国	0.539	0.551	0.591	0.699	0.752	0.614
东部	0.569	0.625	0.731	0.831	0.874	0.716
中部	0.496	0.525	0.538	0.681	0.756	0.583
西部	0.541	0.495	0.490	0.579	0.627	0.533

前沿有效,表明我国绝大部分省份的全要素水资源利用效率尚未达到有效。全要素水资源利用效率大于 0.8 的省份依次为北京、上海、浙江、江苏、四川,这些省份多属于东部沿海发达城市,经济发展水平和技术创新能力相对较高,同时产业结构相对合理,经济转型升级相对较快,基本形成了创新驱动发展的新局面,其中北京和上海已初步形成以现代服务业为主体、以战略性新兴产业为引领、以先进制造业为支撑的现代产业体系。而四川水资源总量丰富,人均水资源拥有量超过全国平均水平,水资源使用基本可以省内自给自足。

另外,从测算结果来看,我国省际间全要素水资源利用效率存在较大的差异,总体上呈现出东南地

区较高,而西北地区较低的态势。其中海南和内蒙古的利用效率低于 0.2,新疆、青海、广西、吉林、黑龙江的利用效率都低于 0.4,这些省份大多处于中、西部内陆地区,经济发展和科技发展水平相对较慢。其中,海南、内蒙古、青海、广西和新疆,一方面因独特自然条件影响,水利工程发展相对欠缺,配套水资源调蓄设施尚未能覆盖全部区域,农田水利有效灌溉面积低,节水设施相对落后,农业水资源利用效率较低;另一方面内蒙古、青海和新疆主要发展特色农牧产业后导致了畜牧产品生产量的增加,由于人口和入境旅游人口激增加大了农牧产品的消耗。吉林和黑龙江是我国传统的重工业基地,产业结构以高耗水产业为主,对水资源的影响程度较大。

3. 中国全要素水资源利用效率的时空分异特征

图 3 显示在样本期内中国及东部、中部、西部 3 个地区全要素水资源利用效率在时间维度上变化趋势。中国以及东部、中部、西部地区的全要素水资源利用效率呈现出下降—上升—下降—上升的 W 形变化趋势:第一次拐点出现在 2004 年,我国全要素水资源利用效率达到最低点;第二次拐点出现 2010 年,这在一定程度上验证了上述全要素水资源利用效率的定义。此外,在 2006 年之前,西部地区的全要素水资源利用效率比中部地区全要素水资源利用效率高,在 2006 后,中部地区的全要素水资源利用效率则比西部地区要高,可能的原因是随着我国提出节水型社会的建设,我国的技术水平不断上升,且在东、中、西部地区间呈现出东部—中部—西部扩散趋势。

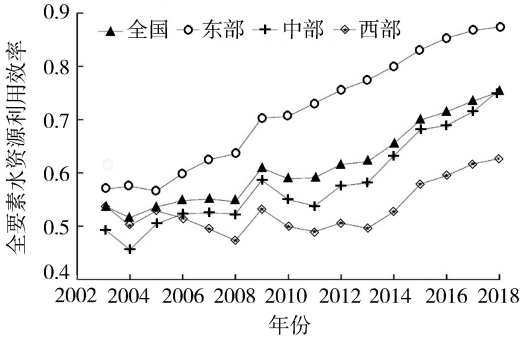


图 3 2003—2018 年中国及其东部、中部、西部
全要素水资源利用效率走势

①由于排版限制,只展示部分年测度结果,如有读者感兴趣可向作者索取。

从全国各区域来看,东部地区、中部地区和西部地区的全要素水资源利用效率呈现出明显差异,分别为0.716、0.583、0.533,呈现出典型的东高西低特征,东部地区的全要素水资源利用效率遥遥领先。在样本期内,我国整体全要素水资源利用效率总是高于中部地区和西部地区,而东部地区高于我国整体水资源利用效率,这个结论与马海良等研究结论一致^[24],主要因为东部地区经济发达,市场机制较为完善,产业结构不断调整升级,导致水资源利用从粗放型向节约型,从低附加值产品向高附加值产品转型。

4. 中国全要素水资源利用效率影响因素

根据上文模型的定义,在运用随机前沿模型估计Shephard 水资源距离函数,测算全要素水资源利用效率的同时,能够得到无效率方程的估计结果,见表3。

表3 无效率方程估计结果

变量	系数	t-ratio
常数项	2.889 ***	5.532
lnEL	-0.233 ***	-5.278
lnWE	0.030 **	2.242
lnCP	1.292 ***	12.429
lnER	0.033	1.142
(lnER) ²	-0.017 ***	2.999
lnTL	-0.489 ***	-13.074
lnTS	-0.263 ***	-6.020
lnFIS	-0.019	-0.712
lnIS	-0.982 ***	-8.228
lnWS	-0.161 ***	-7.747
σ^2	0.059 ***	16.268
γ	0.02 ***	2.711
对数似然函数	-11.102	
似然比 LR	326.168	

注:***, ** 分别表示在1%、5%水平上显著。似然比LR 为模型相对于不考虑无效率项的普通线性模型的似然比值,显著性水平为1%时临界值为25.55。

表3的结果表明我国区域的全要素水资源利用效率不同程度地受到了该区域经济发展水平、水资源禀赋、城镇化水平、环境规制、技术进步、贸易结构、外资规模、产业结构和用水结构的影响。具体而言:

第一,经济发展水平系数在1%水平上显著为负,表明全要素水资源利用效率与经济发展水平呈正相关,验证了东部地区全要素水资源利用效率相对较高。经济发展水平较高的区域往往受益于水资源的规模经济,经济高速增长导致地方政府预算增加,这反过来又有助于为改善水资源和防治水污染的基础设施提供资金。

第二,水资源禀赋系数在5%水平上显著为正,

表明全要素水资源利用效率与水资源禀赋存在显著的负相关,验证了我国存在“资源诅咒”现象,丰水区利用水资源的机会成本通常较低,当在进行产业结构规划和生产时,往往过度利用水资源,造成水资源配置扭曲,从而显著降低全要素水资源利用效率。

第三,城镇化水平系数在1%水平上显著为正,表明全要素水资源利用效率与城镇化存在显著的负相关,表明我国目前城镇化建设的速率虽然较快,但在政府主导下的城镇化模式,主要还是通过大规模工业化和农业人口工业化实现,低技能农民向城市转移,通常只能从事低端制造业工作,反而给城市水资源供需平衡和产业用水带来了严重挑战。

第四,环境规制未能通过显著性检验,而环境规制的平方项系数在1%水平上显著为正,表明全要素水资源利用效率与环境规制存在U 形关系,间接地验证了“波特假说”效应的存在。当经济转向高质量发展阶段时,地方政府更加重视环境保护。环境规制不显著表明当前的环境规制水平对全要素水资源利用效率的影响可能处于拐点左侧,继续实施环境规制将会使得全要素水资源利用效率跨过拐点,提升全要素水资源利用效率。

第五,技术进步系数在1%水平上显著为负,表明全要素水资源利用效率与技术创新之间存在显著的正相关。一方面,技术创新投入加大能够有效地减少生产过程中的用水量;另一方面,技术进步提高了劳动力的素质,间接减少了水资源的浪费,提高了全要素水资源利用效率。

第六,经济开放的系数在1%水平上显著为负,表明全要素水资源利用效率与贸易结构存在显著的正向关,表明我国出口贸易比例的提升有助于提升我国全要素水资源利用效率。通常各地区都希望从出口商品中获得更多利润,而发达国家推行的“绿色贸易政策”迫使发展中国家采用新的技术和设备,实施环保的生产工艺,包括减少用水,降低对水资源的依存度,从而提高了区域全要素水资源利用效率。

第七,外资规模未能通过显著性检验,这一结论与丁绪辉等结论一致^[25]。目前尚不清楚外国直接投资是否为全要素水资源利用效率提供了更多的“污染光环”或“污染天堂”,外国直接投资可以通过先进技术和管管理溢出提高资源配置和利用效率,但外国直接投资对全要素水资源利用效率的影响并不是简单的好或坏,而是一个复杂的非线性关系。

第八,产业结构系数在1%水平上显著为负,表明全要素水资源利用效率与第三产业的占比显著正相关,结构红利假说^[26]认为生产要素跨部门、跨产业、跨区域的再配置会释放“结构红利”,随着产业结构由低生产效率产业向高生产效率产业的转变,全国的全要素水资源利用效率可以提高。

第九,用水结构系数在1%水平上显著为负,表明全要素水资源利用效率与工业用水占比呈正相关,从水足迹测算结果可以发现,虽然工业用水量较大,但实际用水量并不多,一般工业用水量约占总用水量的0.5%~10%,即90%以上的水经适当处理后仍能回用。此外,近年来,随着我国对工业生产设备的更新升级,工业用水效率逐步提高,因此用水结构的调整有利于全要素水资源利用效率的提升。

五、研究结论与政策建议

基于水足迹理论,测算我国2003—2018年各个省份水足迹(不含西藏),并将水足迹纳入全要素投入产出指标体系,构建了针对水资源投入要素的Shephard水资源距离函数,对我国区域全要素水资源利用效率进行了测度并分析其影响因素。

1. 研究结论

第一,我国水足迹总量呈波动上升趋势,其中农业水足迹在水足迹总量中占比最高;水足迹增长速度总体而言在2010年之前相对较快,而2010年后增长幅度相对放缓。大部分省份水足迹总量亦呈上升趋势。各个省份的水足迹平均值和年均增长率存在显著差异,水足迹平均使用量最大的是山东省,最小的为青海省;年平均增长率最高为内蒙古,最低为北京,已呈现负增长率。

第二,我国整体全要素水资源利用效率呈现东高西低特征,全国以及东部、中部、西部地区的全要素水资源利用效率呈现出下降—上升—下降—上升的W形变化趋势;我国省际间全要素水资源利用效率存在较大的差异,总体上呈现出东南地区全要素水资源利用效率较高,而西北地区全要素水资源利用效率较低的态势,基本与各省份经济发展格局特征相似。

第三,环境规制对全要素水资源利用效率呈现U形关系,且当前的环境规制水平使得全要素水资源利用效率到达拐点附近;经济发展水平、技术水平贸易结构、产业结构以及用水结构对我国全要素水资源利用效率存在显著的正向作用;而城镇化对全

要素水资源利用效率存在显著负向影响;外资规模未能通过显著性检验。

2. 政策建议

第一,加快产业结构优化,因地制宜调整产业结构升级。产业结构的升级有利于提升区域全要素水资源利用效率,政府应加大对第三产业的扶持政策,引导产业合理有序的转移,实现产业结构的优化升级。同时立足当地水资源环境承载能力,鼓励企业加大研发资金的投入,淘汰相对高耗水产业,积极发展低耗水、节水产业,因地制宜地制定产业结构升级规划。

第二,加大研发投入,增强自主创新能力。研究表明技术进步有利于提高全要素水资源利用效率,应增加研发投入,政府应将市场机制与行政管理相结合,改善科技创新环境,加强知识产权保护,促进企业自主研发的积极性,提高企业技术创新研发强度,建立节水型标杆企业,形成工业产业集聚的辐射效应。

第三,推进区域协同合作,加快先进技术扩散。各级政府应该破除地区贸易保护主义,加强跨区域的经济技术交流,促进资本、技术人才等资源要素的自由流动,加快先进技术和水平梯度的扩散,不断缩小区域间全要素水资源利用效率的差异。

第四,注重城镇化质量提升,推进高质量新型城镇化发展。目前我国城镇化水平对全要素水资源利用效率具有显著的负向作用。因此,应该根据不同省份的特色,科学制定城镇化规模和速度,加强城乡产业一体化,推动城镇化建设由“量”向“质”转变,形成更高水平的新型城镇化格局,破解城市可持续发展“资源有限”瓶颈。

第五,发挥环境规制的正向激励效应,推进水生态文明建设。上文分析表明环境规制对提升全要素水资源利用效率同时具有正向和负向激励效应。因此,各省份必须将水生态文明建设放在压倒性位置,在最严格水资源管理制度和“双控”行动等制度下,结合自身发展情景,制定差异化的环境规制政策,组合多种环境政策工具,同时设定具体可操作、量化的节水指标,充分发挥环境规制的正向激励效应,从源头上减少水资源使用量。

参考文献:

[1] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [J]. Priorities for Water Resources Allocation and

- Management, 1993, 13(4): 13-26.
- [2] HOEKSTRA A Y. Perspectives on water: an integrated model-based exploration of the future [M]. [s. l.]: International Books, 1998.
- [3] SUN Y Y, ZHI Y, ZHAO Y W. Indirect effects of carbon taxes on water conservation: a water footprint analysis for China[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 279:1-10.
- [4] XIONG Y L, TIAN X, LIU S W, et al. New patterns in China's water footprint: analysis of spatial and structural transitions from a regional perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: 1-15.
- [5] SUN S, FANG C L. Factors governing variations of provincial consumption-based water footprints in China: an analysis based on comparison with national average [J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 914-923.
- [6] SUN S. Water footprints in Beijing, Tianjin and Hebei: a perspective from comparisons between urban and rural consumptions in different regions[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 507-515.
- [7] SUN S, FANG C L, LV J Y. Spatial inequality of water footprint in China: a detailed decomposition of inequality from water use types and drivers [J]. Journal of Hydrology, 2017, 553: 398-407.
- [8] FAN J L, WANG J D, ZHANG X, et al. Exploring the changes and driving forces of water footprints in China from 2002 to 2012: a perspective of final demand[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1101-1111.
- [9] 孙才志, 张灿灿, 郜晓雯. 中国“四化”建设对水足迹强度的影响分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4): 767-778.
- [10] HU J L, WANG S C, YE H F Y. Total-factor water efficiency of regions in China [J]. Resources Policy, 2007, 31(4): 217-230.
- [11] WANG F T, YU C, XIONG L C, et al. How can agricultural water use efficiency be promoted in China? a spatial-temporal analysis [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 145: 411-418.
- [12] 张兆方, 沈菊琴, 何伟军, 等. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价——基于超效率 DEA-Malmquist-Tobit 方法 [J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2018, 20(4): 60-66.
- [13] YAO X L, 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.
- [14] ZHOU Z X, WU H Q, SONG P F. Measuring the resource and environmental efficiency of industrial water consumption in China: a non-radial directional distance function [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 1-11.
- [15] 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.
- [16] LUO Y Y, YIN L, QIN Y, et al. Evaluating water use efficiency in China's western provinces based on a slacks-based measure (SBM)-undesirable window model and a Malmquist productivity index [J]. Symmetry, 2018, 10(8): 301-314.
- [17] YANG J, LIU X J, YING L M, et al. Correlation analysis of environmental treatment, sewage treatment and water supply efficiency in China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 128-135.
- [18] 巩灿灿, 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.
- [19] ZHOU P, ANG B W, ZHOU D Q. Measuring economy-wide energy efficiency performance: a parametric frontier approach [J]. Applied Energy, 2011, 90(1): 196-200.
- [20] 邢贞成, 王济干, 张婕. 中国区域全要素生态效率及其影响因素研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(7): 119-126.
- [21] DU K R, LIN B Q. International comparison of total-factor energy productivity growth: a parametric Malmquist Index Approach [J]. Energy, 2016, 118: 481-488.
- [22] 孙付华, 杨一帆, 沈菊琴, 等. 基于水足迹-LMDI 模型的江苏省水资源利用与经济发展的脱钩关系研究 [J]. 江苏社会科学, 2020(6): 1-8.
- [23] 孙才志, 张蕾. 基于分形的中国地均农畜产品虚拟水规模分布的时空演变研究 [J]. 地理科学, 2009, 29(3): 402-408.
- [24] 马海良, 黄德春, 张继国. 考虑非合意产出的水资源利用效率及影响因素研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(10): 35-42.
- [25] 丁绪辉, 高素惠, 吴凤平. 环境规制、FDI 集聚与长江经济带用水效率的空间溢出效应研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(8): 148-155.
- [26] 胡亚茹, 陈丹丹. 中国高技术产业的全要素生产率增长率分解——兼对“结构红利假说”再检验 [J]. 中国工业经济, 2019(2): 136-154.

(责任编辑: 张志琴)