

环境约束下中国与世界主要国家技术效率和生产率的测度与比较

程时雄^{1,2}, 陈利鹏¹

(1. 湖北大学 商学院, 武汉 430062; 2. 湖北大学 开放经济研究中心, 武汉 430062)

摘要: 运用含非期望产出的超效率SBM(slack based measure)模型和GML(global Malmquist-Luenberger)指数,对中国与世界主要国家1991—2016年的分别在考虑和不考虑环境约束下的技术效率和全要素生产率进行测度与比较。研究发现,不考虑环境约束的测度结果忽略了一国发展所造成的污染损失,导致技术效率与生产率被高估;中国的技术效率在考虑环境因素后显著下降,总效率排名从样本中的第16位下降至第40位。时间趋势上,中国的环境效率与技术效率的差距呈现先扩大后缩小,且近年来有逐渐趋同的态势;动态视角上,不考虑环境约束时中国的全要素生产率变化总体呈现增长趋势,但在考虑环境因素后中国的环境全要素生产率转变为下降趋势,这其中,技术进步的下降是影响环境全要素生产率变化的主要因素。

关键词: 环境约束; 超效率SBM(slack based measure)模型; GML(global Malmquist-Luenberger)指数; 技术效率; 环境全要素生产率
中图分类号: F124.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2022)12—0001—11

一、引言

改革开放以来,中国凭借高速的经济增长率实现了经济社会的跨越式发展,一跃成为世界第二大经济体。然而,对于中国经济快速增长的动力和源泉一直以来存在着较大争议,以“克鲁格曼质疑”为代表的观点认为大规模的资本积累和密集的劳动力投入是中国等东亚国家经济增长的主要源泉,而非技术进步和效率提升。这一观点并未得到学术界的普遍认同,学者们后续的研究探讨呈现多样化的结论,其中较具代表性的观点认为中国的经济增长在不同时期的特征有所不同,随着改革开放的推进,中国经济增长逐渐由要素驱动转变为生产率驱动,“增长奇迹”是高投入增长和高效率增长的共同作用结果。新古典经济学表明,生产要素投入量的增加和全要素生产率的提升是经济增长的直接原因,随着中国经济增速放缓、经济进入“新常态”及资源的稀缺性逐渐显现,无论过去增长动力和源泉如何,想要在未来保持中高速增长,提高经济增长质量,全要素生产率的提升都将是未来发展的重要方向。但是,传统的全要素生产率测度方法并没有考虑生产过程中的污染物等“非期望产出”,从而使得测算结果偏离真实的经济增长绩效,扭曲了社会福利水平的评价,甚至会政策误导。

近年来,一些学者开始尝试将资源或环境因素纳入到效率与生产率的分析框架之中,以考虑环境因素后的全要素生产率重新核算中国的经济增长绩效,但有关中国与其他国家环境约束下效率与生产率的比较研究还不够丰富。面对国际国内环境保护与经济增长的矛盾日益严峻,测算环境约束下中国与世界主要国家间的技术效率与全要素生产率,并将不考虑环境约束下的情况作为对比,分析中国与世界主要国家间的相对效率水平及差异,探究造成生产率变动与差异的具体原因,有利于中国向绿色发展方式转变,对中国迈向高质量可持续发展具有重要的理论和现实意义。

二、文献综述

随着环境污染所导致的负外部性引起人们的重视,逐渐有学者开始将环境因素纳入效率与生产率的分析框架中,重新对中国的经济增长绩效进行分析,相关研究可以从测度方法和研究对象两个方面展开。

第一,测度方法方面。现有研究主要采用参数的随机前沿分析(SFA)和非参数的数据包络分析(DEA)(通常与Malmquist指数结合)等方法对考虑环境因素的效率与生产率进行测算。其中,DEA方法由于无需设

收稿日期:2022-10-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金“雾霾治理下中国绿色经济增长研究:基于绿色技术创新视角”(19A1L004)

作者简介:程时雄,博士,湖北大学商学院副院长,教授,博士研究生导师,研究方向:世界经济,技术经济;陈利鹏,湖北大学商学院硕士研究生,研究方向:环境经济,技术经济。

定具体的生产函数形式,可以同时模拟多重投入和产出及能将非期望产出纳入分析框架,并且可以对生产率进行分解而被广泛应用,在评价考虑环境因素后中国的效率与生产率也取得了显著性成果(陈超凡,2016;冯志军等,2017;Xia和Xu,2020;陈黎明等,2020;陈浩等,2020;赵娜等,2021),但这些研究大都主要基于SBM(slack based measure)模型和ML(Malmquist-Luenberger)生产率指数方法所展开。尽管SBM模型解决了传统DEA方法中的松弛性问题和非期望产出问题,但该模型所测算的效率值结果介于0~1,无法对效率值为1的有效单元进行进一步区分。同时,ML指数在测度跨期距离函数时可能存在线性规划无可行解和难以进行跨期比较等问题。因此,学者们逐渐使用超效率SBM模型和GML(global Malmquist-Luenberger)指数等作进一步改进(Li和Shi,2014;Oh,2010),但是同时将这两种方法相结合来考虑环境约束下中国的效率与生产率的研究较少。

第二,研究对象方面。现有文献主要集中于中国省区(郭四代等,2018;Xia和Xu,2020;陈黎明等2020;孙亚男和杨名彦,2020;赵娜等,2021)、城市(吴建新和黄蒙蒙,2016;蔺鹏和孟娜娜,2021;余奕杉和卫平,2021;李慧和余东升,2022)及行业层面(Shi和Li,2019;滕泽伟,2020;崔和瑞等,2021;刘亦文等,2021)的研究,仅有少量涉及国别层面(Du和Lin,2017;Wang et al,2021),并且国别层面的研究多以能源视角进行展开,以考虑环境约束与否为视角的比较研究较少。

通过文献梳理可以发现,目前有关环境约束下中国效率与生产率的分析已经得到较为广泛的关注,但在研究方法上,现有研究采用的效率评价模型难以对同时位于生产前沿面上的决策单元实现进一步的区分,在全要素生产率动态变化测度上,一般的ML指数难以解决线性规划无解或跨期比较等问题。因此,如何准确度量各国的技术效率与生产率并且进行可比较研究是值得关注的重点。在研究视角上,现有研究多以分析中国单一主体为主,针对中国与其他国家环境约束下效率与生产率的比较研究还不够丰富。与其他国家相比,中国在其经济快速增长的同时,环境约束下的技术效率水平如何?环境约束下的全要素生产率动态变化又是怎样?及造成这种差异的源泉在哪?对于这些问题的研究可以明确中国与不同经济体间的相对效率差异及来源,可为进一步推进中国的绿色转型提供指引。

基于此,本文可能的边际贡献在于:第一,研究方法上,构建包含非期产出的超效率SBM模型测度环境约束下的技术效率,同时结合全局参比的GML指数度量环境全要素生产率的动态变化,科学解决了有效决策单元难以区分、难以进行跨期比较等问题。第二,研究视角上,以国际比较为切入点,对中国与世界主要国家环境约束下的技术效率与生产率进行全面和系统的测度,从静态和动态两个方面比较分析中国与世界主要国家环境约束下的相对效率差异,弥补了国别层面相关研究的不足。第三,数据处理上,在测度环境约束下各国技术效率与生产率的基础上,同时将不考虑环境约束下的技术效率与生产率情形作为对比分析,有利于科学评价中国经济增长与环境污染之间的联系。

三、研究设计

(一)测度模型

1. 非期望产出-超效率SBM模型

Tone(2004)提出含非期望产出的SBM(slack based measure)模型并没有很好地解决传统DEA模型中可能存在多个决策单元同时位于生产前沿面的问题,因而无法对效率值为1的有效单元进行有效评价与比较。为实现进一步区分,本文借鉴Li和Shi(2014)的研究构建包含非期望产出的超效率SBM模型。

假设现有 N 个决策单元(DMU),每个单元包含 α 个投入要素(X)、 β_1 个期望产出(Y^g)和 β_2 个非期望产出(Y^b)三种要素, $\lambda \in R^n$ 为权重向量。则定义包含非期望产出的环境技术生产可能集为

$$P = \{(x, y^g, y^b) | x \geq X\lambda, y^g \leq Y^g\lambda, y^b \geq Y^b\lambda, \lambda \geq 0\} \quad (1)$$

含非期望产出的SBM模型则可用式(2)表示:

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^{\alpha} \frac{S_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{\beta_1 + \beta_2} \left(\sum_{r=1}^{\beta_1} \frac{S_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{\beta_2} \frac{S_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (2)$$

$$s.t. \ x_0 = X\lambda + S^-; y_0^g = Y^g\lambda - S^g; y_0^b = Y^b\lambda + S^b; S^- \geq 0, S^g \geq 0, S^b \geq 0, \lambda \geq 0$$

其中:向量 $S = (S^-, S^g, S^b)$ 分别为投入要素(X)、期望产出(Y^g)和非期望产出(Y^b)的松弛变量。目标函数 ρ^* 为 $DMU(x_0, y_0^g, y_0^b)$ 的环境效率值, 当且仅当 $S^- = 0, S^g = 0, S^b = 0$, 即 $\rho^* = 1$, 此时含非期望产出的 $DMU(x_0, y_0^g, y_0^b)$ 才是有效率的。

但是, 利用式(2)计算出的结果可能会出现多个 DMU 的环境效率值为 1 的情形, 进一步构建含非期望产出的超效率 SBM 模型, 对于 $\rho^* = 1$ 的 DMU 做如下处理:

$$\delta^* = \min \frac{1 - \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^{\alpha} \frac{\bar{x}_i}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{\beta_1 + \beta_2} \left(\sum_{r=1}^{\beta_1} \frac{\bar{y}_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{\beta_2} \frac{\bar{y}_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j x_j; \quad \bar{y}^g \leq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_j^g; \quad \bar{y}^b = \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_j^b; \quad \bar{x} \geq x_0, \bar{y}^g \leq y_0^g, \bar{y}^b \leq y_0^b, \bar{y}^g \geq 0, \lambda \geq 0$$

其中: δ^* 为有效单元在超效率模型进一步测算的效率值; $\bar{x}$ 、 $\bar{y}^g$ 、 $\bar{y}^b$ 分别为被评价单元投入、期望产出、非期望产出的投影值(目标值)。

2. Global Malmquist Luenberger 指数

Malmquist 生产率指数自 Fare et al(1994) 提出后便到了广泛应用, 但该指数并不能直接考虑环境污染等非期望产出, 基于此, Chung et al(1997) 引入方向性距离函数的概念, 提出了一个可以解决含非期望产出的生产率指数用以测度环境全要素生产率, 即 ML(Malmquist-Luenberger) 指数, 但是一般的 ML 指数仍存在着线性规划无可行解和不能进行跨期比较等问题。Oh(2010) 采用 GML(global Malmquist-Luenberger) 指数方法, 成功解决了上述问题。因此, 借鉴前人的研究, 构建 GML 指数如下:

$$GML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t; x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \quad (4)$$

其中: x 、 y 、 b 分别为投入变量、期望产出变量和非期望产出变量; $GML^{t,t+1}$ 为一国生产率由 t 到 $t+1$ 时期的变动情况。与 ML 指数分解类似, GML 指数也可以将生产率变动来源分解为技术效率变化(GEC)和技术进步变化(GTC):

$$GML^{t,t+1}(x^t, y^t, b^t; x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) = \frac{1 + D^t(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \times \left[\frac{\frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^t(x^t, y^t, b^t)}}{\frac{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}} \right]$$

$$= \frac{TE^{t+1}}{TE^t} \times \left(\frac{BPG_{t+1}^{t,t+1}}{BPG_t^{t,t+1}} \right) = GEC^{t,t+1} \times GTC^{t,t+1} \quad (5)$$

其中: $D(x, y, b)$ 为方向性距离函数, 上标 t 为以当期为准; 上标 G 为以全局为准; TE 为当期技术效率; BPG 为当期与全局技术前沿的“最佳实践者差距(best practice gap, BPG)”。若 $GML^{t,t+1}$ 、 $GEC^{t,t+1}$ 和 $GTC^{t,t+1}$ 均大于 1, 则分别表示全要素生产率、技术效率和技术进步提高, 反之则下降。

(二) 变量选取及数据来源

1. 变量选取

投入变量。第一, 劳动投入。从严格意义上讲, 在生产活动过程中由于劳动力的年龄、受教育程度及专业技能等的差异, 劳动力指标选取时应当综合考虑数量和质量两个因素。但是在现有的数据库和统计体系下, 各国对劳动投入衡量的标准不一。因此, 参考大多数研究, 使用各国就业总人数作为劳动投入代理变量。第二, 资本投入。参考现有研究, 使用各国实际资本存量作为资本投入的代理变量。现有统计指标并未直接提供资本存量数据, 使用永续盘存法来对实际资本存量进行估算, 具体计算公式如下: $K_{it} = (1 - d)K_{it-1} + I_{it}$, 其中, K_{it} 为国家 i 在 t 期的资本存量; I_{it} 为不变价投资额; d 为折旧率。基期资本存量的计算借鉴 Young(2003) 的做法, 采用基期资本投入除以 10% 表示; 折旧率借鉴王兵和颜鹏飞(2007) 的研究, 确定为 7%; 不变价投资额使用各国以 1990 年为基期的不变价资本形成总额表示。第三, 能源投入。在传统的效率与生产率分析框架中, 能源作为中间投入指标通常不会被纳入到生产函数中, 但在考虑环境约束下, 能源

消耗作为二氧化碳(CO₂)及其他温室气体等污染物的主要来源,学者们通常也将能源等资源纳入测算框架,以更准确地衡量考虑环境约束之后的效率与生产率。因此本文也将各国的能源消费总量作为投入指标之一,选取各国一次能源消耗总量作为其代理变量。

产出变量。第一,期望产出。与大多数研究文献一样,选取 GDP 来表示期望产出,为提高比较研究的可行性与可信度,按照购买力平价法进行折算,使用各国以 1990 年为基期的不变价 GDP 数据。第二,非期望产出。关于非期望产出的选择,具有较大的弹性,多数文献直接使用 CO₂ 排放量作为环境污染的代理变量,并不能准确衡量生产过程中所排放的污染量,特别是在国别比较视角下,不同国家因发展模式、发展阶段的不同,CO₂ 与温室气体排放总量的差距程度不一。因此,除 CO₂ 排放量外,本文还将甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化合物(HFC_s)、全氟碳化合物(PFC_s)及六氟化硫(SF₆)等温室气体排放量纳入非期望产出,以温室气体排放总量作为环境污染的代表变量,更为准确的衡量各国生产活动所造成的污染情况。

2. 样本选择与数据来源

本文的数据全部来源于世界银行发展指标数据库(WDI)和经济合作与发展组织(OECD)经济、能源(economy、energy)统计数据库。根据数据的可得性、完整性及准确性,所选取的样本时间为 1991—2016 年,剔除数据缺失较为严重的国家后,选取来自世界各大洲共 45 个国家,并根据联合国组织公布的 2022 年《世界经济形式与展望》将 45 个国家划分为发达国家和发展中国家,其中发达国家有:澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、爱尔兰、意大利、日本、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、新加坡、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、以色列、英国、美国 26 个国家;发展中国家有:巴西、智利、中国、哥伦比亚、厄瓜多尔、印度、印度尼西亚、土耳其、马来西亚、墨西哥、尼日利亚、巴基斯坦、秘鲁、菲律宾、俄罗斯、南非、泰国、乌拉圭、越南 19 个国家。

四、测度结果分析

(一)环境效率测度结果

基于上述所构建的含非期望产出的超效率 SBM 模型,分析比较所选 45 个样本国家 1991—2016 年间的效率情况,并将不考虑环境约束下的技术效率作为对比,结果见表 1 和表 2。

从国别来看,各国的技术效率和环境效率值存在着差异,特别是在部分国家(如美国、瑞典、中国、印度等)差异较为明显。其中,越南、南非、中国、印度等国在不考虑环境约束下的技术效率测度结果中排名比较靠前,而一旦考虑资源环境因素后,这些国家的效率值均出现不同程度的下降,排名也随之下降。与之相反,瑞士、日本、法国、丹麦、德国、意大利、瑞典等国的环境效率值整体上大于技术效率值,说明这些国家的相对效率在考虑资源环境情况后反而更高了,并且在环境约束下,丹麦、德国、意大利的环境效率均值接近于 1,瑞士、日本、法国的环境效率均值显著大于 1,表明这些国家的环境效率处于技术的前沿面,是环境效率的主要推动国。具体而言,如果不考虑环境约束,技术效率最高的国家依次为美国、瑞士、波兰、挪威、英国,斯洛

表 1 1991—2016 年世界主要国家技术效率测度结果表^①

国家	1991 年	1996 年	2001 年	2006 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	平均值	排名
美国	2.6904	2.9580	3.4670	3.6694	3.4995	3.4740	3.4223	3.4352	3.4332	3.3999	3.3391	1
瑞士	1.3445	1.1808	1.1693	1.1224	1.1717	1.1571	1.1574	1.1493	1.1371	1.1361	1.1751	2
波兰	1.2419	1.2292	1.0663	1.0559	1.0630	1.0587	1.0268	0.9998	0.9824	1.0055	1.1057	3
挪威	1.0823	1.1736	1.1247	1.1140	1.0225	1.0278	1.0099	1.0014	0.9765	0.9812	1.0910	4
英国	0.9478	0.9374	1.0368	1.0868	1.0830	1.0899	1.1065	1.1192	1.1168	1.1180	1.0348	5
中国	0.7491	0.9499	0.9862	0.9280	0.8262	0.7891	0.7607	0.7347	0.7139	0.7041	0.8844	16
斯洛文尼亚	0.6434	0.6265	0.6360	0.6416	0.6468	0.6636	0.6675	0.6957	0.7103	0.7379	0.6432	41
尼日利亚	0.4267	0.3926	0.4633	0.6492	0.9262	0.9794	1.0327	1.0513	1.0465	1.0086	0.6426	42
印度尼西亚	0.5250	0.5793	0.5539	0.6091	0.6438	0.6595	0.6636	0.6508	0.6440	0.6477	0.5910	43
俄罗斯	0.3513	0.2732	0.4428	0.6822	0.7321	0.7575	0.7602	0.7441	0.7233	0.7261	0.5297	44
泰国	0.3553	0.3902	0.4492	0.5633	0.6252	0.6687	0.6707	0.6544	0.6576	0.6789	0.5098	45
发达国家	0.9415	0.9365	0.9610	0.9739	0.9662	0.9599	0.9543	0.9572	0.9445	0.9629	0.9551	—
发展中国家	0.7494	0.7444	0.7903	0.8504	0.8629	0.8711	0.8664	0.8482	0.8309	0.8495	0.8078	—

① 由于篇幅限制,仅报告中国和总效率排名前后五位国家。

表2 1991—2016年世界主要国家环境效率测度结果表

国家	1991年	1996年	2001年	2006年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	平均值	排名
美国	1.4581	1.4947	1.5523	1.5717	1.5555	1.5530	1.5477	1.5491	1.5489	1.5454	1.5368	1
瑞士	1.3035	1.2542	1.2683	1.2609	1.3232	1.3149	1.3213	1.3220	1.3293	1.3355	1.2935	2
英国	1.0285	1.0340	1.0696	1.1087	1.1203	1.1143	1.1320	1.1476	1.1565	1.1593	1.0876	3
挪威	1.0754	1.1231	1.0828	1.0686	1.0168	1.0197	1.0100	1.0035	0.9033	0.8910	1.0539	4
日本	1.1507	1.1187	1.0714	1.0383	0.9597	0.9416	0.9376	0.9237	0.9189	0.9061	1.0419	5
中国	0.6548	0.7185	0.7169	0.7050	0.6921	0.6823	0.6783	0.6756	0.6717	0.6725	0.6996	40
印度	0.6712	0.7019	0.6890	0.6860	0.6608	0.6526	0.6467	0.6422	0.6446	0.6485	0.6776	41
马来西亚	0.6439	0.6370	0.6331	0.6754	0.6886	0.6907	0.6810	0.6741	0.6708	0.6692	0.6582	42
印度尼西亚	0.6082	0.6289	0.5857	0.6165	0.6326	0.6341	0.6318	0.6208	0.6170	0.6154	0.6136	43
泰国	0.5451	0.5543	0.5581	0.6235	0.6384	0.6487	0.6429	0.6339	0.6333	0.6350	0.5928	44
俄罗斯	0.4713	0.4008	0.5000	0.6138	0.6361	0.6394	0.6345	0.6265	0.6186	0.6178	0.5353	45
发达国家	0.9202	0.9004	0.9103	0.9155	0.9076	0.9088	0.9037	0.8906	0.8824	0.8882	0.9081	—
发展中国家	0.7787	0.7581	0.7379	0.7764	0.8021	0.8011	0.7871	0.7635	0.7543	0.7565	0.7667	—

文尼亚、尼日利亚、印度尼西亚、俄罗斯和泰国等居于末位；如果考虑环境约束，环境效率最高的国家依次为美国、瑞士、英国、挪威、日本，印度、马来西亚、印度尼西亚、泰国和俄罗斯等居于末位。可以看到，无论考虑环境约束与否，美国、瑞士、挪威、英国等国都有着较高的技术效率，而印度尼西亚、俄罗斯、泰国等的技术效率始终处于靠后水平。但是，也有部分国家在两种情况下所得到的结果差异较大，其中，以瑞典为代表的发达国家和以中国为代表的发展中国家所测得的结果及排名差异最为明显，瑞典在不考虑环境约束下测得的技术效率值为0.7898，排名第31位，在环境约束下测度的效率值为0.9086，排名上升至第15位。中国则在不考虑环境约束下测得的技术效率值为0.8844，排名第16位，而在环境约束下的数值为0.6696，排名下降至第40位。通过以上分析可以发现，考虑环境约束与否会对技术效率带来不同程度的影响，传统的技术效率测度未考虑非期望产出会造成明显偏误。

从发达国家与发展中国家的比较来看，在不考虑环境约束条件下，样本中发达国家的技术效率均值为0.9551，已较为接近技术前沿，发展中国家的技术效率均值为0.8078，相对技术前沿面还有一定距离，说明总体上发达国家的技术效率已达到较高水平，发展中国家与发达国家的技术效率相比还有一定的差距，这也意味着发展中国家在技术效率上还存在较大的追赶空间。考虑环境约束之后，发达国家的环境效率均值为0.9081，发展中国家的环境效率均值为0.7667，整体上发达国家的环境效率仍像技术效率一样高于发展中国家。但值得注意的是，发达国家与发展中国家技术效率水平在考虑环境约束后都出现了下降，发达国家的环境效率开始远离技术前沿面，发展中国家的环境效率与技术前沿面的距离进一步扩大。这表明总体上无论是发达国家还是发展中国家的技术效率在考虑环境因素后都出现了效率损失，忽略环境因素的技术效率评价可能会被高估。其原因可能是发达国家与发展中国家在生产过程中均普遍存在着资源利用不足和污染治理成效低下的问题，并且发展中国家的这一现象更为突出。

(二) 中国的环境效率测度结果分析

基于以上分析可以看到，中国作为最大的发展中国家，在不考虑环境约束与考虑环境约束下的技术效率呈现较大的差异。为进一步分析造成这种差异的具体原因，绘制了中国1991—2016年技术效率和环境效率随时间变化的趋势图，如图1所示。

从图1中可以看出，对技术效率而言，在1991—2002年间，中国的技术效率进步较为明显，在样本国中的排名也在不断上升，且在2000—2002年这一时期，已经较为接近技术前沿。这说明伴随我国改革开放的不断深化及市场经

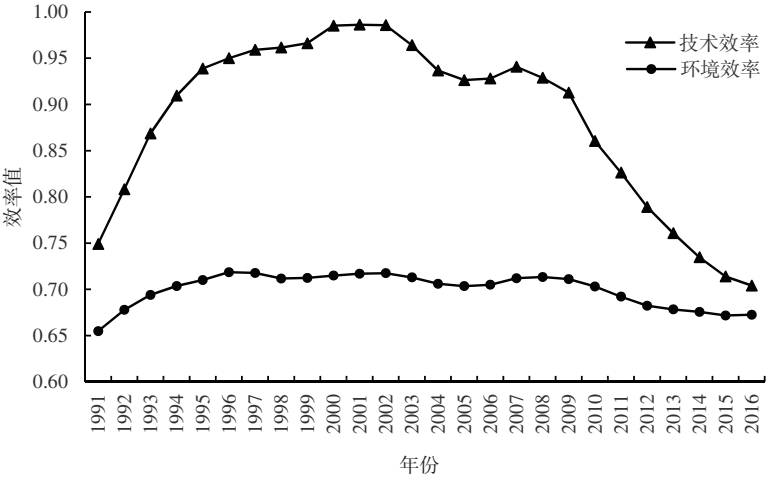


图1 1991—2016年中国技术效率和环境效率变化趋势图

济体制改革的发展,中国的技术效率在此期间实现了较大提高。但在随后的 2002—2007 年期间,我国的技术效率呈现一定程度的先下降后上升的趋势,可能的原因主要是我国在 2001 年加入世界贸易组织之后,一跃成为世界大工厂,进出口贸易量迅速扩大,同时物质资本投入相对有了大幅度的提高,但由于劳动力及生产技术的提升需要一定的时间,市场资源结构的不匹配,进而导致技术效率出现下降。但随着市场不断趋于成熟,技术效率在 2005—2007 年后有所改进。另外可以看到自 2008 年后中国的技术效率出现了明显的下降,可能的原因是随着 2008 年全球金融危机的爆发,各国的经济发展都受到了不同程度的影响,使得整体的技术效率呈现下行趋势,但是中国的技术效率下降更为严重,主要是因为金融爆发危机后,中国出台了 4 万亿元的投资项目来应对经济硬着陆风险,资本形成总额结构发生了显著变化,更多的投资与信贷流入了基建与房地产行业,而这些行业通常具有跨期时间长和资本回报率等特点,在一定程度上造成了技术效率的下降。

环境效率的变化则与技术效率有着明显不同,如图 1 所示,在考虑环境因素后中国的技术效率显著下降,整个研究期间总体呈现波动上升趋势,但变动起伏相对较为平缓。同期在所选样本国家的排名中,中国的环境效率一直处于靠后水平,说明与它国相比,中国整体的环境绩效仍需进一步提高。分时期来看,中国环境效率相对技术效率的差距呈现先扩大后缩小的趋势。1991—2002 年,我国的技术效率出现了较大幅度的提升,但在这一时期环境效率的上升幅度却较小,这主要与这一阶段中国的发展模式息息相关,20 世纪 90 年代初,中国的经济体制改革初步确立,市场化进程不断加快,同时政府绩效考核主要以经济增长水平为主,地方政府官员热衷于 GDP 等相关经济指标的排名,环境管制力度相对宽松,环境成本也因地方政府的纵容而人为压低(周黎安,2007),高速的经济增长直接带来了严重的环境污染和能源消耗,这种粗放型增长模式使得环境效率难以实现质的提升。2002—2008 年,环境效率虽然与技术效率变动情形类似,也呈现先下降后上升的趋势,但总体环境效率水平的波动幅度较小。而在 2008 年金融危机爆发后,与技术效率变动情况不同的是,中国的环境效率水平仍然较为平稳,仅出现了小幅下降,并且在 2015 年后又出现改善的趋势。可能的原因是随着中国对资源环境保护的重视,以牺牲资源环境为代价的经济发展模式有所改善,中国自“十五”开始便不断强调可持续发展的必要性,2006 年开始推出节能减排政策,首次在“十一五规划纲要”中将节能减排作为约束性目标,提出了“十一五”期间单位 GDP 能耗降低 20% 左右,主要污染排放总量减少 10% 的目标,并在“十二五”期间进一步提出单位 GDP 能耗降低 16% 左右,主要污染物排放总量减少 8%~10% 等约束性指标,同时为了切实实现节能减排与可持续发展目标,采取了一系列的经济、法律甚至必要的行政手段,环境管制的力度不断提升(钱争鸣和刘晓晨,2015),因而使得环境效率与技术效率的差距逐渐缩小,并且近年来呈现趋同的态势,这也表明近年来我国的经济发展与节能减排协同发展已经有所成效。但需要注意的是,无论是技术效率还是环境效率,中国当前的总体效率水平维持在 0.65~0.70,这与先进发达国家效率水平相比仍比较低,还存在进一步提升的空间。

(三)环境全要素生产率测度及其分解

技术效率度量的是各国与当期生产前沿面的距离关系,表明了各国对已有资源的利用程度,是一种静态分析指标。而全要素生产率是一种动态分析,对之进行考察可以清晰各国环境全要素生产率的变动情况及其来源。在上述利用含非期望产出的超效率 SBM 模型对 45 个世界主要国家环境效率的分析的基础上,进一步使用 GML 指数测度考虑环境约束下各国的环境全要素生产率变化及其分解情况。同时将不考虑环境约束时的各国全要素生产率及其分解情况作为对比,结果见表 3。

国别而言,从不考虑环境约束下的全要素生产率变化测度结果来看:第一,样本 45 个国家中,只有智利(0.9930)、厄瓜多尔(0.9973)、秘鲁(0.9952)、波兰(0.9966)、南非(0.9951)、乌拉圭(0.9894)、越南(0.9760) 7 个国家的全要素生产率指数小于 1,说明只有这些国家的生产率在研究期间总体呈现下降的趋势,而其他国家的生产率均呈现增长趋势。其中,美国的年均全要素生产率增长最高,为 2.54%,中国的全要素生产率则以年均 0.66% 的速度增长。第二,从全要素生产率的分解情况来看,不同国家全要素生产率增长的来源有所不同,如美国的技术效率指数为 1.0094,技术进步指数为 1.0159,表明该国全要素生产率的增长既来源于技术效率的提升又来源于技术进步的提高,而日本、瑞士和挪威等国的技术效率指数小于 1,技术进步指数大于 1,表明这些国家全要素生产率的上升主要来源于技术进步。与此相反,哥伦比亚[技术效率指数(EC)=1.0024,技术进步指数(TC)=0.9975]、厄瓜多尔(EC =1.0031, TC =0.9942)和菲律宾(EC =1.0186, TC =0.9958)等

国的技术进步指数均小于1,而技术效率指数均大于1,表明这些国家的全要素生产率上升主要源于技术效率的改进而非技术进步;考虑环境约束后,从环境全要素生产率变化的测度结果来看:第一,只有法国、德国、尼日利亚、乌拉圭、新加坡、印度尼西亚、斯洛文尼亚、丹麦、泰国、马来西亚、瑞典、芬兰12国环境全要素生产率的变化指数大于1,呈现进步性变化,其余国家均呈现出下降趋势。这其中,下降幅度最大的为美国,环境全要素生产率年均下降10.38%,中国环境全要素生产率下降幅度也较大,年均下降达到7.11%。第二,从环境全要素生产率的分解结果来看,环境全要素生产率的变化主要受技术进步指数的变化影响,在环境全要素生产率指数大于1的12个国家中,除芬兰、新加坡、乌拉圭等技术效率的改进对其环境全要素生产率有促进作用外,其余国家环境全要素生产率的改进主要源于技术进步的贡献。而在环境全要素生产率小于1的国家中,除日本、意大利的技术进步指数大于1外,其余国家的技术进步指数均小于1,这表明无论是发达国家还是发展中国家,环境技术进步是影响环境全要素生产率增长的主要因素。

从发达国家与发展中国家的比较来看,在1991—2016年整个样本期间,不考虑环境约束下发达国家和发展中国家的全要素生产率指数均值分别为1.0075和1.0066,均大于1,表明总体上发达国家和发展中国家在此期间的全要素生产率均呈现增长态势。而考虑环境约束后发达国家和发展中国家的环境全要素生产率指数均值分别为0.9821和0.9737,均小于1,这意味着在考虑环境约束后全要素生产率变化的转变为下降态势,说明总体上无论是发达国家还是发展中国家普遍存在着以牺牲资源和环境换取增长的现象。从其分解情况来看,发达国家和发展中国家在考虑环境约束和不考虑环境约束下的全要素生产率来源有较大差异。对于不考虑环境约束下全要素生产率的分解,在发达国家中,技术效率指数为1.0004,技术进步指数为1.0071,这表明发达国家全要素生产率的增长主要来源于技术进步的贡献。而在发展中国家中,技术效率指数为1.0060,技术进步指数为1.0006,这与发达国家有着明显不同,发展中国家整体全要素生产率增长主要来源于技术效率的改善,技术进步的推动作用较小。原因可能是由于经济发展水平的不同,发达国家整体层面更加重视研发投入和科技创新,在技术进步方面一直保持着优势,而发展中国家整体层面由于在技术创新处于相对劣势地位,往往呈现出对发达国家技术层面的追赶态势,因而其全要素生产率的提升主要来源于技术效率的改进。对于考虑环境因素时环境全要素生产率的分解,发达国家的环境技术效率指数为0.9987,环境技术进步指数为0.9834,发展中国家的环境技术效率指数为0.9990,环境技术进步指数为0.9747,这表明总体上无论是发达国家还是发展中国家,技术效率与技术进步指数的下降均影响了环境全要素生产率的改善,但技术效率指数接近于1,影响程度相对较小,因而技术进步指数的下降是制约发达国家和发展中国家环境全要素生产率改善的主要因素,并且这一因素对发展中国家的影响程度更大。

(四)中国环境全要素生产率测度及其分解

为明确中国全要素生产率的变化及其来源情况,进一步分析比较1991—2016年中国考虑环境约束与不考虑环境约束下全要素生产率的变动及其分解情况,结果见表4和如图2、图3所示。

从整体上看,中国的全要素生产率指数均值为1.0066,环境全要素生产率指数均值为0.9289,表明在此期间若不考虑环境约束,中国全要素生产率以年均0.66%的速度增长,而在考虑环境因素后,中国的环境全要素生产率则转变为以年均7.11%的速度下降,这一结果与刘华军等(2018)的研究结果类似。刘华军等(2018)的研究发现,中国的全要素生产率在绿色发展背景下未升反降,且年均下降4.36%。不过本文的全要素生产率在考虑环境因素后以更快的速度下降,可能的原因主要有两点:第一,与以往研究不同,本文所使用的“非期望产出”用温室气体排放总量来衡量,其不仅包含了CO₂排放量,还包含了甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化

表3 1991—2016年世界主要国家全要素生产率TFP和环境TFP指数变化均值及其分解^②

国家	不考虑环境约束			考虑环境约束		
	EC	TC	TFP	GEC	GTC	环境TFP
美国	1.0094	1.0159	1.0254	1.0023	0.8941	0.8962
英国	1.0066	1.0024	1.0091	1.0048	0.9920	0.9968
德国	1.0010	1.0059	1.0070	0.9971	1.0121	1.0092
日本	0.9962	1.0129	1.0090	0.9905	1.0042	0.9946
法国	0.9994	1.0063	1.0056	0.9978	1.0124	1.0102
加拿大	1.0010	1.0074	1.0084	0.9979	0.9860	0.9839
意大利	0.9971	1.0065	1.0036	0.9898	1.0040	0.9938
中国	1.0029	1.0037	1.0066	1.0011	0.9279	0.9289
印度	1.0029	1.0025	1.0054	0.9986	0.9434	0.9421
巴西	0.9955	1.0060	1.0015	0.9852	0.9841	0.9695
南非	0.9983	0.9968	0.9951	0.9933	0.9572	0.9508
俄罗斯	1.0064	1.0012	1.0076	1.0109	0.9540	0.9644
发达国家	1.0004	1.0071	1.0075	0.9987	0.9834	0.9821
发展中国家	1.0060	1.0006	1.0066	0.9990	0.9747	0.9737

② 由于篇幅限制,仅报告金砖五国和七国集团。

合物、全氟碳化合物及六氟化硫等多种污染排放物,更为全面的反映一国在经济发展活动所造成的环境污染情况。根据世界银行的数据显示,中国在 1991—2016 年间温室气体排放总量是 CO₂ 排放总量的 1.26 倍,相对他国而言,温室气体总量高出 CO₂ 排放量的差距更大,这就使得在用温室气体排放量作为非期望产出时拉大了我国的负向产出,因而在一定程度上影响环境全要素生产率下降。第二,本文将所考察的样本时期进行了扩展,整个研究样本时期横跨 26 年,而在发展的早期,我国存在着严重的“重经济增长,轻环境保护”的思想,经济的快速增长很大程度上是以牺牲资源环境为代价的,因而造成了环境管理的无效率,虽然近年来随着国家对环保的重视这一情况有所好转,但在总体上仍会拉低环境全要素生产率的增长。从总体分解情况来看,考虑环境约束与否时全要素生产率变动的来源也有所不同,根据表 4 可以看到,不考虑环境约束时技术效率指数和技术进步指数均大于 1,说明中国全要素生产率的增长来源于技术效率和技术进步的双轮驱动,而在环境约束下,技术效率指数为 1.0011,技术进步指数为 0.9279,因而环境全要素生产率的下降主要是受技术进步指数的下降所导致,一般而言,环境技术进步可以直接通过提升一国的污染处理能力或降低生产活动过程中的能源消耗,以到达降低能源使用和污染排放,从而提升环境全要素生产率的目的,但在研究期间我国的环境技术进步指数小于 1,环境技术进步率呈下降趋势,这表明总体上我国在环境技术进步方面的发展还有所欠缺。

分阶段来看,不考虑环境约束时,中国全要素生产率在 1991—2007 年一直保持着增长趋势,但自 2008 年后开始呈现小幅下降的态势,并且 1991—2007 年全要素生产率的增长主要源于技术效率和技术进步的共同提升,而在 2008 年后技术效率开始出现下降,而技术进步改进的程度较小,进而导致全要素生产率开始出现下降;在考虑环境约束后,环境全要素生产率虽然在整体上呈现下降态势,但是其降幅随时间推移呈现出较大波动,如图 2 所示,环境全要素生产率的变化趋势与环境技术进步指数的变化情形类似,也就是说环境全要素生产率的变动主要来源于技术进步的变动,技术进步是制约中国环境全要素生产率的主要因素。1991—2000 年,中国的环境全要素生产率一直呈现较大幅度的下降态势,2001—2006 年,中国的环境全要素生产率下降幅度开始出现好转,并自 2006 年之后,除 2008—2009 年受全球金融危机影响环境全要素生产率降幅超过 4% 以外,其他年间的降幅均保持在 1%~2%。中国环境全要素生产率指数的这种变化趋势是和国际国内经济环境和政策变化密切相关的,在 1991—2000 年间,随着改革开放的深化和我国工业化、城市化进程的加快,此时的发展模式具有明显“高产出、高耗能、高污染”的粗放型经济增长特征,因而在考虑环境因素后全要素生产率出现明显下降。在 2001 年之后,中国成功加入世界贸易组织,中国的进出口贸易量及外商直接投资进一步扩大,大量的劳动力和自然资源投入到生产市场,温室气体排放总量进一步上升,导致环境全要素生产率一直呈现下降趋势。而从 2006 年开始,我国相继出台各种环境保护政策,如首次将节能减排作为约束性目标加入发展规划纲要,党的十八大以来我国重点强调经济建设与生态文明建设的融合,特别是创新驱动发展战略的实施,环境技术进步明显好转等,使得我国经济发展模式逐渐由粗放型经济增长向集约型增长模式转变,因而环境全要素生产率变化有所好转。

图 3 是 1991—2016 年我国的考虑环境约束和不考虑环境约束下全要素生产率的动态变化曲线,通过对

表 4 1991—2016 年中国 TFP 与环境 TFP 指数变化趋势及其分解

年份	不考虑环境约束			考虑环境约束		
	<i>EC</i>	<i>TC</i>	<i>TFP</i>	<i>GEC</i>	<i>GTC</i>	环境 <i>TFP</i>
1991—1992	1.0791	0.9778	1.0551	1.0350	0.9536	0.9870
1992—1993	1.0744	0.9679	1.0399	1.0240	0.9309	0.9532
1993—1994	1.0472	1.0042	1.0516	1.0139	0.9136	0.9263
1994—1995	1.0222	1.0063	1.0286	1.0093	0.8897	0.8980
1995—1996	1.0118	1.0057	1.0176	1.0118	0.8797	0.8901
1996—1997	1.0096	1.0096	1.0193	0.9989	0.8848	0.8838
1997—1998	1.0026	1.0061	1.0087	0.9916	0.8761	0.8687
1998—1999	1.0088	1.0031	1.0119	1.0010	0.8667	0.8676
1999—2000	1.0197	0.9955	1.0151	1.0035	0.8607	0.8637
2000—2001	1.0082	0.9932	1.0013	1.0029	0.8501	0.8526
2001—2002	0.9995	1.0096	1.0091	1.0008	0.8536	0.8543
2002—2003	0.9968	1.0135	1.0103	0.9936	0.8985	0.8927
2003—2004	1.0151	1.0115	1.0268	0.9904	0.8998	0.8912
2004—2005	1.0084	1.0067	1.0152	0.9965	0.9013	0.8981
2005—2006	1.0101	1.0131	1.0233	1.0020	0.9121	0.9139
2006—2007	1.0136	1.0029	1.0165	1.0100	0.9945	1.0044
2007—2008	0.9873	0.9888	0.9762	1.0019	0.9717	0.9735
2008—2009	0.9728	1.0055	0.9782	0.9968	0.9621	0.9590
2009—2010	0.9627	1.0205	0.9824	0.9888	0.9864	0.9754
2010—2011	0.9802	1.0141	0.9940	0.9843	0.9917	0.9761
2011—2012	0.9652	1.0151	0.9798	0.9859	0.9894	0.9754
2012—2013	0.9639	1.0018	0.9656	0.9941	0.9855	0.9797
2013—2014	0.9659	1.0025	0.9683	0.9961	0.9882	0.9843
2014—2015	0.9717	1.0066	0.9781	0.9942	0.9951	0.9893
2015—2016	0.9862	1.0122	0.9982	1.0013	0.9963	0.9976
均值	1.0029	1.0037	1.0066	1.0011	0.9279	0.9289

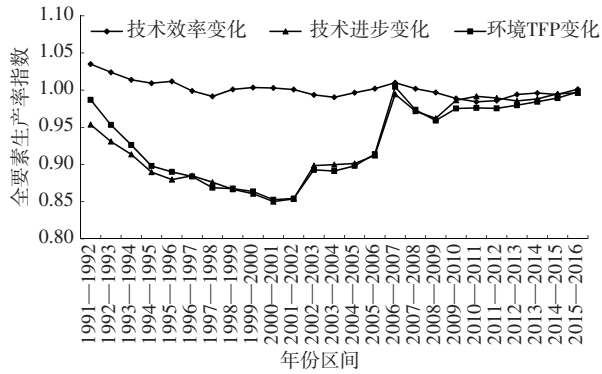


图2 1991—2016年中国环境全要素生产率变化趋势及其分解

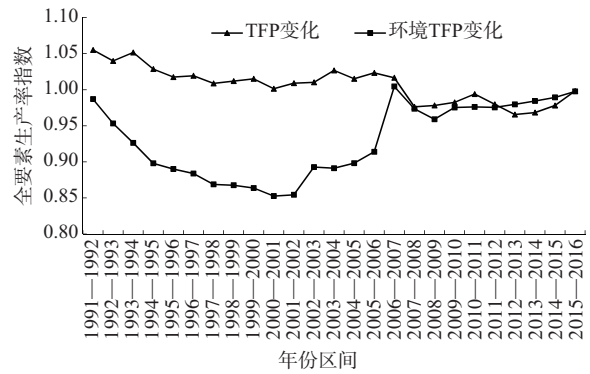


图3 1991—2016年中国TFP与环境TFP动态变化趋势

比可以发现,两种情形的差距随时间变化呈现先扩大后缩小的趋势,1991—2007年忽略环境因素的全要素生产率一直高于环境全要素生产率,尤其是在前十年,中国的全要素生产率一直在增长,环境全要素生产率却在不断下降,这与我国在发展早期存在着“高产出、高耗能、高污染”的粗放型经济增长模式有关。但是自2007年后,二者的差距开始缩小,到2013年,环境全要素生产率变化已经来到不考虑环境约束的全要素生产率变化之上,这表明近年来以牺牲资源环境以促进经济增长的模式有所好转。同时值得注意的是,尽管近年来环境全要素生产率的变化有所好转,但仍呈现一定的下降趋势,并且这种下降主要来源于技术进步指数的下降,而在不考虑环境因素的全要素生产率变化中,技术进步指数近年来是呈现进步性变化并且对全要素生产率的促进作用是在不断上升的,可能的原因是伴随中国创新驱动发展战略的发展,中国的技术进步已经取得了一定幅度的提升,但在环境技术进步方面仍存在一定的不足。

五、结论与政策启示

本文基于生产理论框架,运用世界主要45个国家层面的投入产出面板数据,使用含非期望产出的超效率SBM模型和GML指数测算了环境约束下中国与世界主要国家技术效率与生产率的变动情况,在此基础上对环境全要素生产率变化来源进行分解,探究造成生产率变动与差异的具体原因,同时将不考虑环境约束时的情况作为对比。通过本文的分析,可以将研究结论归纳为以下几点:

首先,与不考虑环境约束时的情形相比,考虑环境约束后的技术效率与全要素生产率水平整体下降明显,忽略一国在经济发展过程中所造成的环境污染损失,会导致技术效率与生产率被高估。其次,对中国而言,在考虑环境因素后的技术效率水平显著下降,总效率排名从所选样本国家中的第16位下降至第40位。从时间趋势上看,研究期间的技术效率一直高于环境效率,并随时间推进二者的差距呈现先扩大后缩小,且近年来有逐渐趋同的态势。但是,与发达国家相比,无论是技术效率还是环境效率,当前的总体水平仍不够高,还存在进一步提升的空间。最后,从全要素生产率的动态变化及其分解情况来看,在不考虑环境因素下,中国的全要素生产率变化呈现增长的趋势,并且这种增长趋势来源于技术效率和技术进步的双轮驱动。而在考虑环境约束后,中国的环境全要素生产率变化转变未下降趋势,从其分解来看,环境全要素生产率的变化情形与环境技术进步指数的变化情形相一致,技术进步率的下降是制约中国环境全要素生产率的增長的主要因素。

针对上述研究结论,为提高我国考虑环境因素后的技术效率与全要素生产率,提出如下对策建议。

首先,借鉴先进发达国家经验,加强环境技术应用与推广。与先进发达国家相比,我国的环境技术应用与推广程度相对较低,政府可通过一定的财政激励措施,同时积极展开宣传与培训,引导企业在生产活动中使用环境保护型技术,减少环境污染排放,进而提高技术效率水平。其次,加强绿色技术研发投入与创新,提高绿色技术进步率。我国当前的环境全要素生产率提升主要来自技术效率的改进,技术进步的贡献作用较小。这表明当前中国创新驱动发展背景下,技术进步虽已经取得了一定的提升,但在绿色技术进步方面还有所欠缺。因此,应加大有关清洁能源生产和污染治理与减排等方面的技术研发投入,促进绿色技术创新水平进一步提升,最终形成依靠技术进步和效率改进双轮驱动的环境全要素生产率增长模式。

参考文献

- [1] 陈超凡, 2016. 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, 33(3): 53-62.
- [2] 陈浩, 刘培, 许佩, 2020. 城市绿色全要素生产率演变机制研究——基于城市能源与土地要素约束的视角[J]. 中国人口·资源与环境, 30(9): 93-105.
- [3] 陈黎明, 王俊昊, 赵婉茹, 等, 2020. 中国区域绿色全要素生产率的影响因素及其空间特征[J]. 财经理论与实践, 41(4): 122-132.
- [4] 崔和瑞, 王浩然, 赵巧芝, 2021. 中国工业绿色全要素生产率动态演变特征及驱动因素研究[J]. 统计与决策, 37(3): 117-120.
- [5] 冯志军, 陈伟, 杨朝均, 2017. 环境规制差异、创新驱动与中国经济绿色增长[J]. 技术经济, 36(8): 61-69.
- [6] 郭四代, 全梦, 郭杰, 等, 2018. 基于三阶段 DEA 模型的省际真实环境效率测度与影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 28(3): 106-116.
- [7] 李慧, 余东升, 2022. 中国城市绿色全要素生产率的时空演进与空间溢出效应分析[J]. 经济与管理研究, 43(2): 65-77.
- [8] 蔺鹏, 孟娜娜, 2021. 绿色全要素生产率增长的时空分异与动态收敛[J]. 数量经济技术经济研究, 38(8): 104-124.
- [9] 刘华军, 李超, 彭莹, 2018. 中国绿色全要素生产率的地区差距及区域协同提升研究[J]. 中国人口科学, (4): 30-41, 126.
- [10] 刘亦文, 欧阳莹, 蔡宏宇, 2021. 中国农业绿色全要素生产率测度及时空演化特征研究[J]. 数量经济技术经济研究, 38(5): 39-56.
- [11] 钱争鸣, 刘晓晨, 2015. 环境管制与绿色经济效率[J]. 统计研究, 32(7): 12-18.
- [12] 孙亚男, 杨名彦, 2020. 中国绿色全要素生产率的俱乐部收敛及地区差距来源研究[J]. 数量经济技术经济研究, 37(6): 47-69.
- [13] 滕泽伟, 2020. 中国服务业绿色全要素生产率的时空分异及驱动因素研究[J]. 数量经济技术经济研究, 37(11): 23-41.
- [14] 王兵, 颜鹏飞, 2007. 技术效率、技术进步与东亚经济增长——基于 APEC 视角的实证分析[J]. 经济研究, (5): 91-103.
- [15] 吴建新, 黄蒙蒙, 2016. 中国城市经济的绿色转型: 基于环境效率和环境全要素生产率的分析[J]. 产经评论, 7(6): 98-115.
- [16] 余奕杉, 卫平, 2021. 中国城市绿色全要素生产率测度研究[J]. 生态经济, 37(3): 43-52.
- [17] 赵娜, 李光勤, 何建宁, 2021. 省域环境全要素生产率时空差异及其影响因素[J]. 经济地理, 41(4): 100-107.
- [18] 周黎安, 2007. 中国地方官员的晋升锦标赛模式研究[J]. 经济研究, (7): 36-50.
- [19] CHUNG Y H, FARE R, GROSSKOPF S, 1997. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach[J]. Journal of Environmental Management, 51(3): 229-240.
- [20] DU K, LIN B, 2017. International comparison of total-factor energy productivity growth: A parametric Malmquist index approach[J]. Energy, 118: 481-488.
- [21] FARE R, GROSSKOPF S, NORRIS M, et al, 1994. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries[J]. The American Economic Review, 84(1): 66-83.
- [22] LI H, SHI J, 2014. Energy efficiency analysis on Chinese industrial sectors: An improved super-SBM model with undesirable outputs[J]. Journal of Cleaner Production, 65: 97-107.
- [23] OH D, 2010. A global Malmquist-Luenberger productivity index[J]. Journal of Productivity Analysis, 34(3): 183-197.
- [24] SHI X, LI L, 2019. Green total factor productivity and its decomposition of Chinese manufacturing based on the MML index: 2003—2015[J]. Journal of Cleaner Production, 222: 998-1008.
- [25] TONE K, 2004. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks based measure (SBM) approach[R]. Tokyo: GRIPS Policy Information Center.
- [26] WANG R, ASSENOVA V A, HERTWICH E G, 2021. Energy system decarbonization and productivity gains reduced the coupling of CO₂ emissions and economic growth in 73 countries between 1970 and 2016[J]. One Earth, 4(11): 1614-1624.
- [27] XIA F, XU J, 2020. Green total factor productivity: A re-examination of quality of growth for provinces in China[J]. China Economic Review, 62: 101454.
- [28] YOUNG A, 2003. Gold into base metals: Productivity growth in the People's Republic of China during the reform period[J]. Journal of Political Economy, 111(6): 1220-1261.

Measurement and Comparison of Technical Efficiency and Productivity between China and Major Countries in the World under Environmental Constraints

Cheng Shixiong^{1,2}, Chen Lipeng¹

(1. School of Business, Hubei University, Wuhan 430062, China;

2. Open Economy Center, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: Using the super-SBM (slack based measure) model with undesirable output and GML (global Malmquist-Luenberger) index, the technical efficiency and total factor productivity of China and other major countries in the world from 1991 to 2016 were measured and compared, respectively, with and without considering environmental constraints. It is found that the measurement results without considering environmental constraints ignore the pollution loss caused by a country's development, which leads to the overestimation of technical efficiency and productivity. China's technical efficiency dropped significantly when environmental factors were taken into account, with the overall efficiency ranking dropping from 16th to 40th in the sample. In terms of time trend, the gap between environmental efficiency and technical efficiency in China first widened and then narrowed, and there was a trend of gradual convergence in recent years. From the dynamic perspective, the change of China's total factor productivity shows an overall growth trend without considering environmental constraints, but it turns to a downward trend after considering environmental factors. Among them, the decline of technological progress is the main factor affecting the change of China's total factor productivity.

Keywords: environmental constraints; super-SBM (slack based measure) model; GML (global Malmquist-Luenberger) index; technical efficiency; environmental total factor productivity