

【产业经济】

中国钢铁企业绿色技术效率研究

何 枫¹, 祝丽云^{1,2}, 马栋栋¹, 姜 维^{1,3}

(1. 北京科技大学东凌经济管理学院, 北京 100083;

2. 河北农业大学海洋学院, 河北 秦皇岛 066003;

3. 中国钢铁工业协会 北京 100711)

【摘要】 目前能源环境约束下的中国钢铁工业绿色转型问题受到了学术界越来越多的关注。本文构建了考虑非期望产出的网络 SBM-DEA 模型,从铁前工序和铁后工序两阶段视角测算了 2009—2013 年中国钢铁企业绿色技术效率,重点探讨了环境规制强度对绿色技术效率的影响。测算结果显示,钢铁企业整体的以及铁前和铁后工序阶段的绿色技术效率均呈现倒 U 型曲线特征。从生产流程的角度看,铁前工序阶段在效率挖掘方面潜力相对更大;从区域分布的角度看,东、中、西部地区钢铁企业的绿色技术效率依次递减。进一步的实证分析结果表明,当前的环境规制强度与绿色技术效率之间的负相关关系并不显著,资源循环利用率与绿色技术效率之间的正相关关系也不显著,未能观测到环境保护、资源循环利用与企业产出增长“双赢”的效果。然而,研究结果也表明研发投入可以显著促进绿色技术效率增长。因此,在加强环保监管力度的前提下,提高环境规制强度、增加环保投入及自主研发投入是中国钢铁企业绿色技术效率提升可考虑的重要途径。

【关键词】 绿色技术效率; 非期望产出; 网络 DEA; 环境规制

【中图分类号】F424.4 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1006-480X(2015)07-0084-15

一、问题提出

作为国民经济支柱之一的钢铁产业是传统的高能耗、高污染产业。中国粗钢产量自 1996 年以来连续 19 年居世界第一;与此同时,钢铁产业毫无疑问已成为中国能源消耗及污染排放大户。2009—2013 年钢铁产业的年均能耗占到全国能耗的 16.9%, 年均固体废弃物排放占到全国固废排放的 12.6%。近几年中国钢铁产业在节能减排方面已经取得了显著成效,2013 年吨钢综合能耗降至

【收稿日期】 2015-05-19

【基金项目】 国家自然科学基金面上项目“减量化与低碳双重约束下中国高能耗制造企业技术效率评价与提升研究”(批准号 71272160);河北省科技计划项目“能源与环境约束下河北省钢铁产业网络 DEA 效率评价及产业结构升级研究”(批准号 15454013D);教育部科学技术委员会战略研究重大项目“碳交易视角下制造业全产业链综合价格指数战略研究”(批准号 KJW-A-1410)。

【作者简介】 何枫(1975—),男,湖南浏阳人,北京科技大学东凌经济管理学院教授,博士生导师,管理学博士;祝丽云(1981—),女,河北南和人,北京科技大学东凌经济管理学院博士研究生,河北农业大学海洋学院讲师;马栋栋(1987—),男,河南太康人,北京科技大学东凌经济管理学院博士研究生;姜维(1972—),男,江苏盐城人,北京科技大学东凌经济管理学院博士研究生,中国钢铁工业协会高级工程师。通讯作者:何枫,电子邮箱:hefeng@manage.ustb.edu.cn。

591.63 千克标煤,废渣综合利用率提高到 80.43%,但是距离“十二五”规划中提出的到 2015 年实现吨钢综合能耗 580 千克标煤与固体废弃物综合利用率 97%的约束性指标还有很长一段距离。《中国制造 2025》规划中也明确指出,全面推进钢铁、有色金属等资源消耗大、污染排放多的粗放制造向绿色制造转变。由此可见,实现绿色转型已经成为目前中国钢铁产业面临的一个亟待解决的重大课题,而提高钢铁企业技术效率是钢铁工业绿色转型的根本。因此,在严峻的能源环境约束下,各钢铁企业对考虑综合资源利用和环境损失值后的绿色技术效率^[1]进行更加客观、合理、准确地评价,并进一步分析企业整体绿色技术效率的影响因素,对于提升钢铁企业绿色技术效率、实现资源、环境和经济的多赢具有重要意义。

早期关于钢铁企业技术效率的评价大多只是考虑了能源约束^[2-4]。随着废气、废水和废渣等非期望产出对环境的影响日益加剧,杜春丽和成金华^[5]、韩一杰和刘秀丽^[6]分别将三废、二氧化碳排放量作为非期望投入予以效率测算,这与钢铁企业的实际生产流程不相符。张庆芝等^[7]、He et al.^[8]用非期望 SBM-DEA 模型,将三废作为非期望产出来处理。此外,关于钢铁企业技术效率影响因素的文献,主要从企业规模^[9,10]、所有制形式^[11-13]、技术创新和资源循环利用^[14]等方面展开研究。然而,以上研究均基于传统 DEA 模型,视钢铁企业为“黑箱”,忽略了其内部各子过程的联结机制,不能进一步探究导致整体低效的深层次原因。网络 DEA 方法则是多阶段结构决策单元绩效评价的一种有效分析手段。继 Fare and Grosskopf^[15]提出网络 DEA 概念后,出现了各种径向网络 DEA 模型^[16-19],并被广泛应用于效率测算^[20,21]。Tone and Tsutsui^[22]构建了非径向网络 SBM-DEA 模型。但以上网络 DEA 相关理论及应用研究均没有考虑非期望产出因素。

由此可见,在中国钢铁企业绿色技术效率研究方面仍有较大改进空间。在研究方法上,大多数研究基于传统 DEA 模型,将钢铁企业视为“黑箱”。本文构建了考虑非期望产出的网络 SBM-DEA 模型,首次从铁前工序和铁后工序两阶段视角,评价整体及各阶段绿色技术效率,结果更符合实际生产过程。在变量选取方面,大多数研究不涉及联结各生产阶段的中间变量。本文不仅考虑了能耗和污染排放物,还纳入生铁这一中间变量,构建了钢铁企业两阶段绿色技术效率评价指标体系,避免了因忽略各生产工序的链接而带来的效率估计偏差。在影响因素分析方面,大多数研究以传统 DEA 测算出的技术效率为因变量,在解释变量选择上没有考虑环境规制因素。本文则以网络 DEA 测算出的整体绿色技术效率为被解释变量,重点讨论了环境规制对绿色技术效率的影响。

二、考虑非期望产出的网络 SBM-DEA 模型

单阶段生产过程中考虑非期望产出的效率测算方法主要有方向距离函数法(DDF)^[23]、基于松弛量的方法(SBM)^[24,25]以及 Fukuyama and Weber^[26]提出的基于松弛量的效率损失测算方法(SBI)。在实际的多阶段复杂生产过程中经常会出现诸如环境污染物等非期望产出。人们往往期望各阶段的投入和非期望产出相对较少,期望产出越多越好,各阶段按照其重要程度合理配置资源,以实现决策单元整体效率的提高。为解决多阶段网络结构决策单元中的非期望产出问题,Lozano et al.^[27]将 DDF 方法拓展到网络结构中,提出了网络方向距离函数模型(NDDF),Fukuyama and Weber^[28]将 SBI 方法拓展到网络结构中提出了网络基于松弛量的效率损失法(NSBI)。但是,前者没有考虑投入产出变量的松弛问题,后者则是通过测算决策单元技术无效率程度的大小,从侧面反映运营绩效并提出改善措施。为进一步改进上述测算方法,本节基于 Tone 提出的非期望 SBM-DEA 模型^[24]以及网络 SBM-DEA 模型^[22]的构建思想,定义了考虑非期望产出的网络 SBM-DEA 模型,称之为非期望产出网络 SBM-DEA 模型。

根据 Fare et al.^[29]提出的传统环境生产技术,建立多阶段网络结构中考虑污染物排放产出与要素资源投入的网络环境技术。如图 1 所示,设有 $n(j=1, \dots, n)$ 个决策单元,每个决策单元包括 $k(k=1, \dots, K)$ 个子过程, I_k 和 R_k 分别为第 k 个子过程的投入和产出个数。 $(k-1, k)$ 表示子过程 $k-1$ 和子过程 k 之间的节点。第 k 个子过程投入 $x_{ij}^k (i=1, \dots, I_k)$, 生产得到期望产出 $y_{rj}^k (r=1, \dots, R_k)$ 和非期望产出 $u_{pj}^k (p=1, \dots, P_k)$ 。连接部门 $k-1$ 和部门 k 的中间产品用 $z_j^{(k-1, k)} \in R_+^{I_{(k-1, k)}} (j=1, \dots, n; (k-1, k) \in L)$ 表示。 $\lambda_j^k (j=1, \dots, n)$ 表示子过程 k 生产过程中密集度的密度矢量。

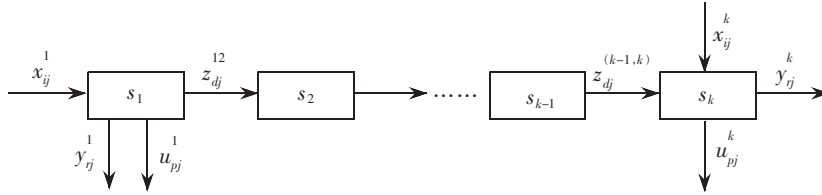


图 1 考虑非期望产出的多阶段生产过程决策单元(DMU)结构

资料来源:作者绘制。

假设网络生产可能集满足闭集合、凸集、联合弱可处置性、投入和期望产出的强可处置性和联合弱可处置性,运用 DEA 方法将生产规模报酬可变前提下的网络环境技术模型化为:

$$T = \left(\begin{array}{l} x_i^k \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^k x_{ij}^k, k=1, \dots, K \\ y_r^k \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j^k y_{rj}^k, k=1, \dots, K \\ u_p^k \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^k u_{pj}^k, k=1, \dots, K \\ z^{(k-1, k)} = \sum_{j=1}^n z_j^{(k-1, k)} \lambda_j^{k-1} (\forall (k-1, k)) \\ z^{(k-1, k)} = \sum_{j=1}^n z_j^{(k-1, k)} \lambda_j^k (\forall (k-1, k)) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j^k = 1, k=1, \dots, K \end{array} \right) \quad (1)$$

以上网络环境技术给出了考虑环境约束后产出的可能前沿,是测算多阶段绿色技术效率的基础。基于投入松弛变量 s_i^{k-} 、期望产出松弛变量 s_r^{kg+} 和非期望产出松弛 s_p^{kb+} ,被评价单元 DMU_0 的投入产出导向的效率评价模型可定义为:

$$\rho_0^* = \min_{\lambda^k, s_i^{k-}, s_r^{kg+}, s_p^{kb+}} \frac{\sum_{k=1}^K w^k \left[1 - \frac{1}{I_k} \left(\sum_{i=1}^{I_k} \frac{s_i^{k-}}{x_{i0}^k} \right) \right]}{\sum_{k=1}^K w^k \left[1 + \frac{1}{R_k + P_k} \left(\sum_{r=1}^{R_k} \frac{s_r^{kg+}}{y_{r0}^k} + \sum_{p=1}^{P_k} \frac{s_p^{kb+}}{u_{p0}^k} \right) \right]}$$

s.t. $x_0^k = X^k \lambda^k + s_i^{k-}, k=1, \dots, K$

$y_0^k = Y^k \lambda^k - s_r^{kg+}, k=1, \dots, K$

(2)

$$\begin{aligned}
 u_0^k &= U^k \lambda^k + s_p^{kb+}, k=1, \dots, K \\
 Z^{(k-1,k)} \lambda^{k-1} &= Z^{(k-1,k)} \lambda^k (\forall (k-1, k)) \\
 \sum \lambda^k &= 1, s_i^{k-}, s_r^{kg+}, s_p^{kb+}, \lambda > 0
 \end{aligned}$$

其中, w^k 是事前指定的权重, 表示第 k 阶段的效率对决策单元整体效率值的相对重要程度, $\sum_{k=1}^K w^k = 1, w^k \geq 0 (\forall k)$ 。 $Z^{(k-1,k)} \lambda^{k-1} = Z^{(k-1,k)} \lambda^k (\forall (k-1, k))$, 表示在保持投入和产出之间的连续性时, 两个子过程之间的链接活动是自由不受约束的。 ρ_0^* 是 DMU_0 的投入产出导向整体效率。 当且仅当 $\rho_0^* = 1, s_i^{k-*} = 0, s_r^{kg+*} = 0$ 且 $s_p^{kb+*} = 0$ 时, DMU_0 是整体绿色技术有效的。 第 k 阶段的投入产出导向效率值可表示为:

$$\rho_k = \frac{1 - \frac{1}{I_k} \left(\sum_{i=1}^{I_k} \frac{s_i^{k-*}}{x_{i0}^k} \right)}{1 + \frac{1}{R_k + P_k} \left(\sum_{r=1}^{R_k} \frac{s_r^{kg+*}}{y_{r0}^k} + \sum_{p=1}^{P_k} \frac{s_p^{kb+*}}{u_{p0}^k} \right)}, k=1, \dots, K \quad (3)$$

其中, $s_i^{k-*}, s_r^{kg+*}, s_p^{kb+*}$ 是模型(2)中投入、期望产出和非期望产出的最优解。

三、能源环境约束下钢铁企业两阶段绿色技术效率测算

1. 投入、产出与中间变量的选取

现代钢铁联合企业的生产工艺流程主要包括烧结、炼铁、炼钢、连铸和轧钢工序。 借鉴国内外主要代表文献, 依据数据口径的统一性、可比性及可操作性原则, 将钢铁企业生产活动概念化为由铁前工序阶段和铁后工序阶段串联而成的一般两阶段网络结构。 把生铁产生之前的所有工序统称为铁前工序阶段, 生铁产生之后的所有工序为铁后工序阶段, 如图 2 所示。 在铁前工序阶段, 企业利用固定资产净额、员工、能源和焦炭四种投入变量获得中间产品生铁, 作为炼钢过程的原材料之一。 除此之外, 在铁后工序阶段还需投入固定资产、劳动力、能源对铁水加工生成各种形态钢, 最终产出为工业增加值。 同时, 伴随着期望产出, 两个阶段均有非期望产出废渣和废气。

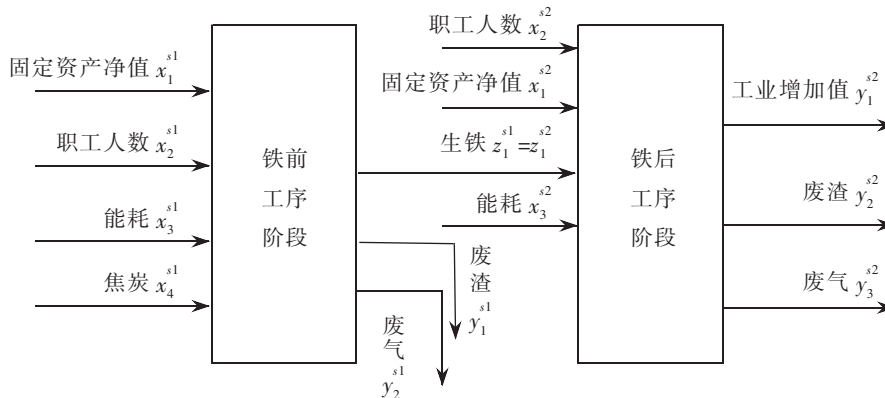


图 2 钢铁企业两阶段生产过程

资料来源:作者根据钢铁生产流程绘制。

(1)投入变量。这里选取资本、劳动、能源和焦炭四个要素。现有文献一般以固定资产净值^[3,4]、资产总额^[30]作为资本投入,以年末职工人数作为劳动投入,能源消耗指标主要有吨钢综合能耗^[31]和总能耗^[32]。本文选择每年的固定资产净额作为资本投入,并通过以2009年为基期的固定资产投资价格指数进行调整;劳动投入以企业年平均职工人数作为衡量指标;能源投入是将煤炭、天然气、燃油和电力等其他能源统一折算成标煤,得到综合总能耗。此外,本文还选择了焦炭指标,它是炼铁阶段的独立投入原材料之一,用每年的消耗量衡量。

(2)中间产品变量。生铁,即在高炉炼铁环节投入焦炭和铁矿石等原料所生成的铁水产量。

(3)期望产出变量。期望产出主要有各种实物产出如粗钢、钢材等^[2,33],经济产出如工业总产值^[34]、工业增加值等^[3,4];上市钢铁企业效率分析主要选择主营业务收入^[32]。由于钢铁生产存在长流程和短流程的差异,若以工业总产值指标作为产出变量,有可能忽略采取长流程的企业生产的中间产品,因此,本文选取能体现企业新增价值的变量即工业增加值来衡量,并通过以2009年为基期的工业产品出厂价格指数予以调整。

(4)非期望产出。废渣和废气^[3,4],即在两阶段生产过程中所产生的高炉矿渣、粉煤灰、炼钢转炉炉渣等综合废渣以及CO₂、SO₂、氮氧化物等综合废气。各变量指标的定义见表1。

表1 两阶段模型中投入、产出和中间变量指标体系

类型	变量名称	具体指标
投入变量	固定资产净额	固定资产原值-累计折旧-固定资产减值准备
	职工人数	(上年末职工人数+本年末职工人数)/2
	能耗	各种能源能耗统一折算成标煤的消耗量
	焦炭	年消耗焦炭总量
中间变量	生铁	年均生铁量
期望产出变量	工业增加值	现价工业总产值-工业中间投入+本期应交增值税
非期望产出变量	废渣	年废渣产出量
	废气	年废气产出量

资料来源:作者根据现有文献投入产出指标整理。

2. 样本选取与数据描述

本文以2009—2013年50家重点大中型钢铁企业的面板数据为样本。对于截至2013年末虽已实施了兼并重组,但在生产经营上仍保持一定独立性的企业,如新疆八一、鄂城钢铁等,本文将其作为独立决策单元来评价。剔除废渣等变量缺失的样本,最终选择了38家企业,涵盖了粗钢年产量不足100万吨至3000多万吨的大中小型钢铁企业,其总年产量接近全国粗钢年产量的60%—66%,保证了样本的全面性和代表性。数据主要来自历年《中国钢铁工业统计年报》、《中国钢铁工业环境保护统计》以及《冶金大中型企业财务年报汇编》。结合中国钢铁工业协会专家及钢铁企业生产管理的一般经验,铁前工序阶段和铁后工序阶段投入的固定资产比约为55:45,劳动力比约为45:55,能耗和废渣比约为3:1,废气比约为4:1。各样本变量的统计性描述见表2。

3. 测算结果及分析

根据非期望网络SBM-DEA模型,取 $K=2, w_1=w_2=0.5$,使用maxdea5.2软件估算了中国钢铁企业2009—2013年整体绿色效率、铁前和铁后工序阶段绿色效率,结果见表3。

(1)整体及两阶段绿色技术效率变化趋势分析。研究结果表明,整体上,2009—2013年中国钢铁企业绿色技术效率偏低,具体位于以0.3999为中心的0.2612—0.4812的低位增长区间,明显存

表 2 投入、产出变量样本数据的统计性描述

变量	平均值	标准差	最小值	最大值
固定资产净额(亿元)	214.2790	250.6796	11.4039	1496.0900
职工人数(千人)	34.1342	29.9401	2.2320	143.5760
能耗(百万吨)	4.8677	3.6066	0.3857	20.1444
焦炭(百万吨)	5.8340	4.8895	0.3466	28.4774
生铁(百万吨)	8.7924	7.3378	0.5142	41.9403
工业增加值(亿元)	59.6961	74.1961	0.0001	487.3990
废渣(百万吨)	5.3961	5.0853	0.2784	24.8251
废气(亿立方米)	1617.9170	1461.3480	143.6291	7976.0190

资料来源:根据 2009—2013 年《中国钢铁工业环境保护统计》、《中国钢铁工业统计年报》、《冶金大中型企业财务年报汇编》数据整理。

表 3 2009—2013 年中国钢铁企业整体及两阶段绿色技术效率

		2009	2010	2011	2012	2013	2009—2013 均值
整体	平均值	0.2612	0.4812	0.4559	0.4004	0.4008	0.3999
	最小值	0.0680	0.1490	0.0977	0.0010	0.1299	
	最大值	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
铁前工序阶段	平均值	0.2373	0.3591	0.3595	0.3259	0.3050	0.3173
	最小值	0.0507	0.1054	0.0874	0.0762	0.1002	
	最大值	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	
铁后工序阶段	平均值	0.3004	0.6627	0.5875	0.5273	0.5267	0.5209
	最小值	0.0615	0.1876	0.1081	0.0001	0.1659	
	最大值	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	

资料来源:本文利用 Stata 软件计算。

在较大的提升空间。具体到企业,只有宝钢和苏钢两家企业连续 5 年达到了有效状态,其他钢铁企业则在样本期内存在不同程度的非效率现象,2009—2013 年整体有效钢铁企业数量分别为 4、6、7、6、4 家。从分阶段效率看,考察期内铁后工序阶段效率一直显著高于铁前工序阶段效率。铁后工序阶段效率处于 0.3004—0.6627 的增长区间,而铁前工序阶段效率则处于 0.2373—0.3595 的低位窄幅区间,均值分别为 0.5209 和 0.3173,预示着铁前和铁后阶段效率均偏低。尤其是铁前工序阶段的效率损失更为严重,成为制约钢铁企业整体效率提升的“短板”。考察期内整体绿色技术效率和分阶段绿色技术效率均呈现先增长、后下降的倒 U 型变化态势,只是三种效率值变化的分水岭不同而已。整体和铁后工序阶段绿色效率值均在 2010 年出现了拐点,2011—2013 年缓慢下降,而铁前工序阶段绿色效率在 2011 年达到了峰值。本文认为可能是中国钢铁产业在“十一五”时期节能减排成效显著,绿色技术效率值逐步上升,并在“十一五”时期末达到了峰值。而随着产业发展的资源、环境等制约因素逐步增大,以及《钢铁工业“十二五”发展规划》明确提出了企业平均吨钢综合能耗降至 580 千克标煤等一系列更为严峻的节能减排目标,重点大中型钢铁企业为完成节能减排目标,需要遵循的规制成本进一步提高,可能致使部分钢铁企业继续采用先污染、后治理的模式,环保投资额占主营业务收入的比例由 2010 年的 2.7%增加到 2012 年的 3.5%,在一定程度上导致了该时期绿色技术效率的降低。

(2)两阶段绿色技术效率类型分析。由于钢铁生产过程是一个复杂的大系统,各个子系统的相

互作用对企业整体绩效存在很大的影响。当且仅当两个阶段都有效时,才能实现决策单元的整体有效,任何一个阶段的无效势必会导致企业的系统无效。比如包钢集团,2010—2013年铁后工序阶段的绿色效率值均为1,但铁前工序阶段均表现出很大程度的无效,效率值分别为0.2965、0.3418、0.3659、0.3762,从而导致整体绿色技术效率值分别仅为0.5438、0.5960、0.6012、0.6153。总体上,铁前和铁后工序阶段在样本期均呈现出绿色无效率状态,并且铁前工序阶段的效率值更低,对钢铁产业整体绿色效率值的影响更大。

以2009—2013年样本钢铁企业铁前和铁后工序阶段绿色技术效率均值(0.3173,0.5209)为分界点,可得到两阶段绿色效率矩阵图,如图3所示。总体上,将38家企业分成四大类。第一类企业的两阶段绿色效率值均大于均值,包括宝钢、苏钢、新兴铸管、新冶钢等11家企业,占总数的28.94%。这类企业无论是在生产铁水方面还是在炼钢、产钢方面均领先于其他企业。尤其是宝钢和苏钢,铁前和铁后工序阶段的效率值均为1,说明相对于其他钢铁企业,其在两阶段均达到了相对有效状态,在节能减排及管理上可以作为其他钢铁企业学习的标杆。第二类企业的铁前工序阶段绿色效率值大于均值,铁后工序阶段绿色效率值小于均值,包括青钢和三钢。青钢集团自2011年起在高炉冶炼技术、高铝高镁烧结技术及褐铁矿烧结技术方面均取得了突破,从而大大降低了铁水成本。但该类企业在炼钢、连铸和轧钢等工序上可能还存在较大的问题,经营决策者应重点关注这些工序的投入产出的资源配置及管理效率。第三类企业的铁前工序阶段绿色效率小于均值,铁后工序阶段绿色效率大于均值,包括太钢、包钢、南京、酒泉和水钢5家企业。比如太钢,铁前工序阶段效率年均值仅为0.2839,而铁后工序阶段年均值达到了0.8401。自2006年起,太钢已成为全国第二家实现转炉负能炼钢企业,并一直保持行业领先水平,对于提升整体节能降耗水平、降低成本具有重要作用,但其在烧结和炼铁工序上可能存在不足,值得管理者加以重视。第四类企业的铁前和铁后工序阶段绿色技术效率值均小于均值,近20家钢铁企业属于这种类型,占总数的52.63%,说明一半以上的钢铁企

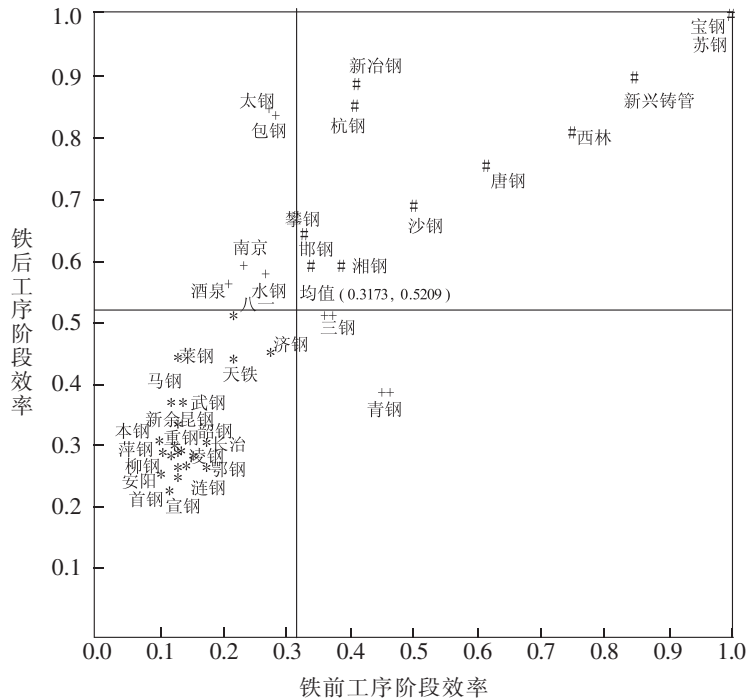


图3 两阶段绿色技术效率矩阵

资料来源：作者绘制。

业在钢铁生产各工序中都是相对无效的。这类企业在资源配置、节能降耗及环境保护方面都还有很大的提升空间,需要向宝钢、苏钢等标杆企业学习管理经验,进一步引进或研发节能减排技术。总之,各钢铁企业可以根据测评结果更加清楚地了解导致自身整体效率不高的根源,从而明确进一步改进的方向。

(3) 整体及两阶段绿色技术效率的地区差异分析。本文按样本企业所在地理位置将其划分为东、中、西部地区钢铁企业,测算并比较了三个地区钢铁企业的整体及两阶段绿色效率的变化趋势,如图4所示。总体而言,东、中、西部地区钢铁企业的年均整体绿色技术效率值分别为0.4637、0.3447和0.3375,全部企业年均整体绿色技术效率值为0.3999,反映了样本期内,中国钢铁企业整体绿色技术效率呈现出从东部地区向西部地区依次递减的趋势。应该引起关注的是,东、西部地区钢铁企业整体绿色技术效率在2010年出现拐点,之后呈现逐年下降的趋势;中部地区钢铁企业则在2011年出现拐点,之后下降为2012年的0.2928,2013年效率值又有所上升。从横向趋势看,东、中、西部地区钢铁企业的平均整体绿色技术效率之比由2009年的0.9970:1.1951:1.0000扩大到2013年的1.8653:1.4060:1.0000。东部地区钢铁企业与中、西部地区钢铁企业之间的平均绿色技术效率水平差距呈现出逐渐扩大趋势,三个地区钢铁企业的绿色技术效率具有比较明显的不平衡发展态势。为了更清楚地了解各地区整体绿色效率差异来源,本文进一步将整体绿色效率分解为铁前和铁后工序阶段绿色效率,分别见图5和图6。就铁前工序阶段而言,东、中、西部地区钢铁企业在样本期内的效率均值分别为0.4015、0.2462和0.2311。就铁后工序阶段而言,东、中、西部地区钢铁企业效率均在2010年出现拐点,之后东、西部地区企业呈现逐渐下降趋势,而中部地区钢铁企业绿色效率在2013年又出现上升趋势。总体上,中、西部地区钢铁企业应充分利用国家的扶持政策,借鉴东部地区钢铁企业的先进绿色技术、管理经验等,优化资源配置,淘汰落后产能,缩小同先进企业的差距。

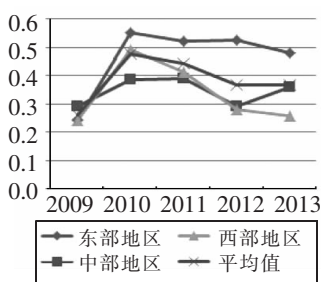


图4 整体绿色效率

资料来源:作者绘制。

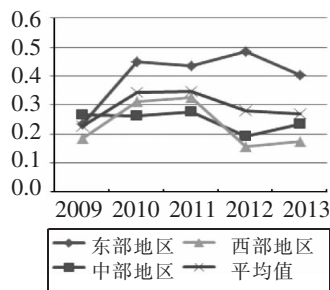


图5 铁前工序绿色效率

资料来源:作者绘制。

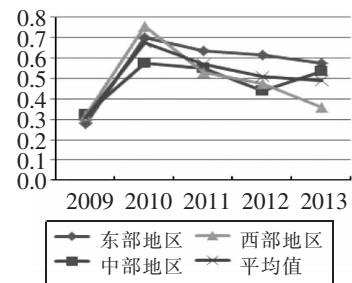


图6 铁后工序绿色效率

资料来源:作者绘制。

四、能源环境约束下绿色技术效率影响因素分析

关于企业技术效率的影响因素分析并没有一个统一的理论框架。国内外现有文献主要从企业所有制形式、企业规模大小、所在地区、企业年龄、财务杠杆等角度考察企业内外部环境因素对其技术效率的影响。现代经济增长理论主张制度是经济增长的重要影响因素。因此,资源环境制度对绿色技术效率及生产率的增长、绿色经济的可持续发展具有根本性作用。随着能源、资源和环境约束日益加强,为实现环境保护和钢铁产业经济增长的“双赢”效果,自20世纪90年代起,中国对钢铁产业实施了一系列严厉的环境规制政策。本文在现有影响因素的基础上,重点探讨环境规制这一重要制度因素的实施是否达到了钢铁产业经济增长与环境可持续发展的“双赢”效果。

1. 环境规制强度对绿色技术效率影响机理分析

企业在一定的环境规制下生产时,必须使自身的污染排放控制在环境规制所要求的排放水平内。当环境规制强度较弱时,意味着其能排放的污染物比较多,企业为在短期内获得较高的利润率,往往采用抽取部分利润或生产投入用于环保设施投资或者污染后的末端治理,而不会进行高额的环境治理技术创新投资。在生产技术、消费者需求等其他条件不变的情况下,污染修复投入一定程度上会造成企业直接成本和间接成本的增加,妨碍企业产出的增长,从而致使企业绿色技术效率及生产率一定程度上的下降^[35,36]。因此,较弱的环境规制强度在降低生产过程中污染排放的同时,会对企业绿色技术效率的提高带来负面效应。当环境规制强度较高时,企业排放的污染较少,市场集中度相对提高,留存下来的企业市场竞争力相对较强。从企业长期可持续发展角度看,若仍采用先污染后被动治理的模式,污染治理成本较高,治理效果也不理想。此时,企业一般趋向于采用两种创新方式:一种是通过污染治理技术创新来提高单位治污支出的效益;另一种是通过生产技术创新,尤其是绿色工艺技术创新,以期达到减少污染物的产生并同时提高生产率的效果。也就是说,当环境规制强度较弱时,由于环境成本较低,一定程度的技术效率下降不足以激励企业进行技术创新;只有当环境规制强度达到一定水平时,才可以诱发环境技术创新、产业技术创新在企业内部的开发、运用和扩散。技术进步带来的收益将会部分或者全部抵消甚至超过生产成本,产生净收益。这也就是波特假说中的“创新补偿机制”对技术效率产生积极效应^[37]。但该效应的发挥是以环境规制政策的恰当设计和被规制企业积极、严格执行为前提的。白雪洁和宋莹^[38]、许冬兰和董博^[39]验证了环境规制可以促进技术效率的提升。但现有相关研究大多基于地区或行业层面数据对环境规制与产业绩效关系进行检验。从微观企业层面看,环境规制强度与钢铁企业整体绿色技术效率的相关性有待进一步检验。

2. 其他变量对绿色技术效率影响的机理分析

一是企业规模。企业规模的大小是影响绿色技术效率的一个重要因素。不同规模企业的优劣势不同。一般而言,企业通过扩大规模,可以实现专业化分工协作、大规模采购和销售以及资源优化配置,使其在资金运作、绿色技术创新、人员素质、管理创新等方面都具有相对优势。但规模经济只能在一定限度内发挥作用,若超过了适度生产规模,则会因管理上的不经济导致成本增加。相比而言,中小企业在反应速度、捕捉市场机会等方面具有相对优势。因此,企业规模对绿色技术效率的影响需要进一步验证。二是要素禀赋结构和绿色技术效率。企业要素禀赋结构的差异使其在不同商品生产上具有相对比较优势。在自然资源一定的前提下,资本劳动比率高的企业,资本由相对稀缺转向相对丰裕,往往会提前实现由劳动密集向资本密集产业的转型升级。而资本密集型产业的能耗和污染相对比较严重,因此不利于其绿色技术效率的提高。三是资源循环利用和绿色技术效率。日益严峻的能源环境约束要求企业更加注重资源的综合、高效利用。对三废资源的循环利用,可以减少资源能源消耗和污染物排放,从而提高企业绿色技术效率。四是技术创新和绿色技术效率。技术创新是企业可持续发展的不竭动力。研发活动是企业科技活动中最具有创新性的部分,R&D支出大小在很大程度上决定了该企业的绿色技术创新能力和技术水平。企业研发投入主要有自主研发、国外技术引进和国内技术转移三种方式。其中,自主研发是实现绿色技术创新的核心源动力。通过高科技研发可以有效地降低企业产品的单位生产成本;但研发活动具有高风险、高投入的特点,其收益具有滞后性和不确定性。因此,自主研发是否有助于提高企业绿色技术效率,需要进一步验证。五是所有制形式和绿色技术效率。一般来说,国有企业受政府监督考核,在环保等方面被赋予强制性社会公共目标,有义务达到更严格的排放标准。而民营企业一般来说更注重实现短期经济效益最大

化,环境保护及可持续性发展理念较弱。因此,能源环境约束下的国有企业的绿色技术效率相比而言会较高。

3. 模型构建和指标选取

以考虑非期望产出的网络SBM-DEA模型计算出的整体绿色技术效率值作为被解释变量,以环境规制作为解释变量;同时,根据技术效率的相关理论及国内外已有研究,并基于数据的可得性,引入企业规模、技术创新、要素禀赋结构、所有制形式和资源循环利用率作为控制变量,建立各钢铁企业整体绿色技术效率与各影响因素之间的关系式。由于绿色技术效率值在0和1之间,运用DEA-TOBIT回归模型,其表达式如下:

$$\ln EF_{it} = \beta_0 + \beta_1 Scale_{it} + \beta_2 \ln(Klr)_{it} + \beta_3 Waste_{it} + \beta_4 Env_{it} + \beta_5 \ln(R\&D)_{it} + \beta_6 Own_{it} + \beta_7 Own_{it} \times Env_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中, t 和 i 分别表示年度 t 及企业 i , EF 为能源环境约束下企业整体绿色技术效率值, β 为待估计参数, ε 为估计误差。各影响变量数据的描述性统计见表4,各变量指标的具体定义如下:

(1)企业规模变量 $Scale$,以企业当年末总资产的自然对数表示。钢铁企业现代化的工艺、设备要求其必须具备合理的规模,否则将难以生产出高质量、低成本的产品。如上所述,企业规模大小对绿色技术效率的影响有待进一步验证。

(2)要素禀赋结构 $\ln(Klr)$,用企业固定资产净值与企业年平均从业人数比率表示。企业所占资本、劳动等生产要素份额的增减对企业技术效率的提升具有重要意义。王兵等^[40]、涂正革^[41]先后均验证了地区环境技术效率与衡量禀赋结构的资本劳动比率负相关。资本劳动比对环境约束下钢铁企业的绿色技术效率是否有影响,尚未被证实。

(3)资源循环利用率 $Waste$,选择企业当年三废综合利用产值与主营业务收入的比率来衡量。绿色经济背景下,钢铁企业对三废的循环利用不但可以减少对环境的污染,还可以变废为宝,提高资源利用率,为企业带来额外的经济效益^[42]。因此,本文预计其与企业绿色技术效率之间存在正相关性。

(4)环境规制强度 Env ,国内外的现有文献中关于环境规制强度的测量方法主要包括以下几种:地方政府颁布的有关环境规制法律政策的数量多少、污染物排放密度、排污费收入、治污投资占企业总成本或产值的比重、治理污染设施运行费用等。基于指标相对完善性和数据可得性的考虑,本文选择环保投入占企业主营业务收入的比率衡量环境规制强度的大小^[42,43]。同上所述,环境规制强度对中国钢铁企业绿色技术效率的影响有待进一步验证。

(5)技术创新 $\ln(R\&D)$,选择企业当年研发投入与主营业务收入的比率来衡量。国内外相关研究大多证实了研发投入对企业技术效率有显著正影响^[44]。对于钢铁企业而言,研发投入对整体绿色技术效率是否有影响,尚未被证实,有待进一步验证。

(6)所有制形式 Own ,民营企业取值0,国有企业取值1。同上所述,本文预计国有企业与能源环境约束下的绿色技术效率有正相关关系。

表4 2009—2013年影响因素变量数据的描述性统计

变量	符号	均值	标准差	最小值	最大值
年末总资产(万元)取对数	$Scale$	15.3794	0.8803	13.5999	17.7657
资产劳动比率(%)	Klr	5.8690	2.9161	0.2761	14.6756
资源循环利用率(%)	$Waste$	1.1238	1.5628	0.0053	12.0014
环保投资率(%)	Env	0.6097	1.1955	0.0006	6.5517
研发投入率(%)	$R\&D$	1.4337	1.2980	0.0015	4.8699

资料来源:根据中国钢铁工业协会2009—2013年的相关统计年报整理。

4. 实证结果及分析

本文运用 Stata12.0 软件,逐步引入自变量及其他控制变量,依次检验各变量对钢铁企业整体绿色技术效率的影响,结果如表 5 所示。

(1)环境规制强度与钢铁企业整体绿色技术效率呈现不显著的负相关关系。该实证结果表明中国钢铁企业的环保投入和污染治理投资并没有达到促进企业绿色技术效率增长的效果。可能有以下两个原因:一是政策部门对环境规制政策的设计强度和方式不恰当,没有发挥绿色技术创新的激励效果。主要体现在规制强度较弱、排污费征收额和三废达标率额度较低,致使大中型冶金企业 2009—2013 年环保投资额占主营业务收入的比例由 3.8%下降到 2.4%。本研究中的 38 家样本企业 2009—2013 年年均环保投资额占主营业务收入的比例为 0.6%,只有 9 家企业的环保投资额比例超过了平均值。绝大多数企业的年均环保投资比都较低,如重钢仅为 0.005%,宣钢 0.06%、萍钢 0.05%,无法激励钢铁企业进行绿色技术创新,因而不能从根本上促进整体绿色技术效率的提高。由前面的效率测算结果可以看出,钢铁企业整体绿色技术效率年均值虽从 2009 年的 0.2612 上升到 2010 年的 0.4812,但 2011—2013 年呈现下降趋势。二是当有关政府部门的监管力度不到位时,被规制企业很可能就没有动力严格、积极地执行环境规制政策。当生产性投资带来的效益远远超过不履行环境规制而缴纳的排污费时,大多数钢铁企业会选择先进行生产性投资,而对环境规制采取消

表 5 整体绿色技术效率影响变量估计结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
常数	-8.7970*** (-4.5100)	-10.1179*** (-4.7500)	-10.2294*** (-4.7100)	-10.2229*** (-4.6900)	-9.0874*** (-4.1800)	-9.1320*** (-4.2000)	-8.9646*** (-4.1100)
Scale	0.4961*** (3.9000)	0.6318*** (4.2900)	0.6374*** (4.2600)	0.6370*** (4.2500)	0.5962*** (4.1200)	0.6102*** (4.1900)	0.6038*** (4.1600)
ln(Klr)		-0.4677** (-2.2400)	-0.4695** (-2.2300)	-0.4684** (-2.2200)	-0.4487** (-2.2100)	-0.4677** (-2.3100)	-0.4591** (-2.2600)
Waste			2.5954 (0.4200)	2.6351 (0.4300)	3.3172 (0.5500)	3.8596 (0.6400)	3.7724 (0.6300)
Env				-0.6025 (-0.0800)	-2.3211 (-0.3000)	-2.1969 (-0.2800)	-6.6447 (-0.6700)
ln(R&D)					0.1099 (1.6400)	0.1208* (1.7800)	0.1320* (1.8900)
Own						-0.2074 (-0.9400)	-0.2829 (-1.1600)
Own×Env							11.4535 (0.7100)
sigma	0.9420*** (13.8100)	0.9133*** (13.7200)	0.9099*** (13.6300)	0.9097*** (13.6200)	0.9097*** (13.6200)	0.9095*** (13.6200)	0.9070*** (13.6200)

注:*,**,*** 分别表示在 10%、5%、1%水平下显著;括号中表示 Z 统计值;sigma 是 Tobit 回归的规模参数。

资料来源:本文利用 Stata 软件估计。

极规避或是最低达标的消极应对策略。因此,就很可能出现部分钢铁企业在监管力度不强时加快生产,而在环境规制严格时则相应地降低产量的现象。

(2)企业规模变量与整体绿色技术效率显著正相关,表明中国大型钢铁企业具有较为显著的规模经济效应。一般来说,大中型钢铁企业在节能减排设备购买、绿色工艺技术投资以及资源回收利用方面具有相对优势。样本企业中规模比较大的有宝钢集团、沙钢集团,实证分析发现其整体绿色技术效率也比较高,与企业规模和绿色技术效率显著正相关的结论相吻合。反映要素禀赋结构的资本劳动比与环境约束下的整体绿色效率显著负相关,说明资本劳动比较高的钢铁企业,其资本密集性更强,相比而言,能源消耗和污染程度越严重。若考虑环境约束条件,则一定程度上会降低企业绿色技术效率值。三废综合利用产值率与绿色技术效率正相关但不显著,说明三废的回收利用只是在一定程度上减少了企业的资源浪费,但不能证实其对企业绿色技术效率的提升有根本的促进作用。研发投入率与企业整体绿色效率显著正相关,这与万伦来和朱琴^[45]的研究结果一致,说明在能源环境约束下,自主研发投资的增加可以增强钢铁企业自主创新能力,促进其进行绿色环保技术创新。钢铁企业通过不断完善绿色生产工艺、技术流程,提高管理水平,改变要素投入配比,进而提升绿色技术效率,塑造核心竞争力。所有制形式系数为负值但不显著,这与我们的预期恰恰相反,原因可能是国有钢铁企业往往被要求严格遵守环境规制,履行其社会责任,完成节能减排任务,因此,更高比例节能减排经费的投入增加了国有企业的沉没成本。而环保修复项目所创造的效益则需要逐年才能看到效果,一定程度上可能影响了其当期的绿色技术效率。所有制形式与环保投资交互项的估计系数为正,但不显著。引入该交叉项旨在分析不同企业所有制形式下的政府规制强度大小对效率的影响情况,估计结果显示并没有通过显著性检验。由此可见,本文尚不能证明国有企业下的政府规制强度与绿色技术效率有显著的相关性。各个显著相关因素的综合作用影响着企业绿色技术效率的大小,如武钢的年均资本劳动比为 10.91,远大于样本企业的年均值 5.86,说明其污染排放额度可能远高于钢铁企业平均值。虽然其研发投入额占主营业务收入比例(1.64%)大于样本企业均值(1.43%),但由于研发投入对技术效率的正向影响具有一定的滞后性,导致其对企业当年绿色技术效率提高的促进作用也是有限的。其环保投资额占主营业务收入比例为 0.29%,远小于样本企业均值 0.60%,无法实现激励其进行绿色环保技术创新的效果。总体来看,以上各影响因素综合作用的结果使得武钢铁前和铁后工序阶段的效率值都比较低。

五、结论与启示

本文运用考虑非期望产出的网络 SBM-DEA 工具,测算了 2009—2013 年能源环境约束下中国钢铁企业的整体、铁前和铁后工序阶段的绿色技术效率,并对整体绿色技术效率的主要影响因素进行了实证分析。结果表明:①考察期内中国钢铁企业整体、铁前和铁后工序阶段绿色技术效率平均值都呈现倒 U 型特征,均值分别为 0.3999、0.3173 和 0.5209。相对来说,铁前工序阶段的绿色技术效率更低,是未来钢铁企业整体效率改进的出发点。②环境规制强度、资源循环利用率与整体绿色技术效率之间并无显著的相关性,说明目前的环境规制强度在提升绿色效率及促进绿色转型方面的效果仍有待提高。钢铁企业对三废的综合利用并不能从根本上提升企业绿色技术效率。③企业规模、研发投入率与钢铁企业整体绿色技术效率显著正相关,而资本劳动比率则与整体绿色技术效率显著负相关。这反映出中国钢铁产业尚存在规模经济效应,各无效钢铁企业可以通过扩大企业规模的方式提高自身的绿色技术效率。此外,增加自主研发投入是钢铁企业环境能源约束下创新节能减排技术、提高整体绿色技术效率的关键路径。根据上述结论,可得到以下启示:

(1)相对来说,铁前工序阶段是中国钢铁产业提高整体绿色技术效率的重点。中国钢铁企业应进一步加强对烧结、炼铁工序流程的投入管理,合理配置人员、固定资产比例,减少能耗浪费,实现既定投入下铁水产出的最大化。

(2)中国钢铁产业应继续提高环境规制强度,以激励钢铁企业进行绿色技术创新。虽然中国钢铁产业的环保绩效指标有了很大改善,但与国外先进水平相比,差距仍然明显,主要原因是环保投入不足。2009—2013年中国大中型冶金企业环保及生态修复支出占主营业务收入的年均比例仅为0.29%,远低于发达国家钢铁企业的平均水平。因此,长期而言,中国应进一步提升钢铁产业的环境规制强度。另外,在政策设计方面,中国相关政府部门尽可能多运用市场激励型的环境规制政策工具进行调控,如排污补贴等手段,最终达到促进钢铁企业主动进行绿色制造的目的。

(3)中国政府应进一步提高监管力度,引导钢铁企业采取积极的环境规制应对措施,改变污染末端治理方式,推行绿色清洁生产。具体来说,中国相关执法部门应通过制定环境决策程序,公开环境信息,加强环境绩效审计等手段来提高监管能力。中国钢铁企业应该在创新绿色生产工艺、从源头上尽可能降低能耗和污染物产生的同时,加大对污染控制技术、二次能源回收技术等方面的先进设备的引进和推广普及,尽可能降低未达标污染物的排放。

(4)中国钢铁企业加大自主研发力度、提高绿色技术创新能力是实现绿色转型的关键。中国钢铁企业“十一五”期间的产能扩张多为重复性建设,科技研发投入面小、强度低。2009—2013年中国大中型钢铁企业科技投入仅占主营业务收入1.9%左右,其中自主研发的投入比重更加有限,仅占主营业务收入的1.4%左右。与发达国家高额研发资金投入下的自主研发相比,其更倾向于采用投入成本较低的技术溢出或者技术引进形式。因此,钢铁企业今后有必要将自主研发放在重要的战略位置,进一步释放研发对自主创新的促进作用。

[参考文献]

- [1]王志平,陶长琪,沈鹏熠. 基于生态足迹的区域绿色技术效率及其影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014,24(1):35-40.
- [2]Wei, Y., H. Liao, and Y. Fan. An Empirical Analysis of Energy Efficiency in China's Iron and Steel Sector [J]. Energy, 2007,32(12):2262-2270.
- [3]张庆芝,何枫,赵晓. 基于SFA的能源消耗、代理成本及股权结构与钢铁企业效率关系研究[J]. 管理学报, 2011, 8(7):1086-1092.
- [4]张庆芝,何枫,赵晓. 基于超效率DEA的中国钢铁产业能源效率研究[J]. 软科学, 2012,26(2):65-68.
- [5]杜春丽,成金华. 中国钢铁产业循环经济效率评价:2003—2006[J]. 产业经济研究, 2009,(5):7-14.
- [6]韩一杰,刘秀丽. 基于超效率DEA模型的中国各地区钢铁行业能源效率及节能减排潜力分析[J]. 系统科学与数学, 2011,31(3):287-298.
- [7]张庆芝,何枫,雷家骥. 技术效率视角下中国钢铁企业节能减排与企业规模研究[J]. 软科学, 2013,27(8):6-10.
- [8]He, F., Q. Zhang, and J. Lei. Energy Efficiency and Productivity Change of China's Iron and Steel Industry: Accounting for Undesirable Outputs[J]. Energy Policy, 2013,54(3):204-213.
- [9]杨家兵,吴利华. 基于DEA的钢铁行业上市公司效率评价[J]. 工业技术经济, 2006,25(2):90-93.
- [10]Movshuk, O. Restructuring, Productivity and Technical Efficiency in China's Iron and Steel Industry, 1988—2000[J]. Journal of Asian Economics, 2004,15(1):135-151.
- [11]Wu, Y. The Productive Efficiency of Chinese Iron and Steel Firms: A Stochastic Frontier Analysis [J]. Resources Policy, 1995,21(3):215-222.
- [12]Zhang, X., and S. Zhang. Technical Efficiency in China's Iron and Steel Industry: Evidence from the New

- Census Data[J]. *International Review of Applied Economics*, 2001,15(2):199-211.
- [13]刘秉镰,林坦,刘玉海. 规模和所有权视角下的中国钢铁企业动态效率研究——基于 Malmquist 指数[J]. *中国软科学*, 2010,(1):150-157.
- [14]张庆芝,何枫,雷家骕. 循环经济下中国钢铁企业技术效率与技术创新研究[J]. *研究与发展管理*, 2014,26(6):1-9.
- [15]Fare, R., and S. Grosskopf. Network DEA[J]. *General Information*, 2000,34(1):35-49.
- [16]Seiford, L. M., and J. Zhu. Profitability and Marketability of the Top 55 U.S. Commercial Banks [J]. *Management Science*, 1999,45(9):1270-1288.
- [17]Sexton, T. R., and H. F. Lewis. Two-stage DEA: An Application to Major League Baseball [J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2003,19(2-3):227-249.
- [18]毕功兵,梁樑,杨锋. 两阶段生产系统的 DEA 效率评价模型[J]. *中国管理科学*, 2007,15(2):92-96.
- [19]Kao, C., and S. Hwang. Efficiency Decomposition in Two-stage Data Envelopment Analysis: An Application to Non-life Insurance Companies in Taiwan[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008,185(1):418-429.
- [20]王宗军,钱丽. 中国不同性质企业技术创新效率及其影响因素研究:基于两阶段价值链的视角[J]. *管理工程学报*,2015,29(2):190-201.
- [21]高莹,李卫东,尤笑宇. 基于网络 DEA 的中国铁路运输企业效率评价研究[J]. *中国软科学*, 2011,(5):176-182.
- [22]Tone, K., and M. Tsutsui. Network DEA: A Slacks-based Measure Approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009,197(1):243-252.
- [23]Chung, Y. H., R. Fare, and S. Grosskopf. Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 1995,51(3):229-240.
- [24]Tone, K. Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks-based Measure(SBM) Approach[R]. Presentation at NAPW III. Toronto, 2004.
- [25]Zhou, P., B. W. Ang, and K. L. Poh. Slacks-based Efficiency Measures for Modeling Environmental Performance[J]. *Ecological Economics*, 2006,60(1):111-118.
- [26]Fukuyama, H., and W. L. Weber. A Directional Slacks-based Measure of Technical Inefficiency [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2009,43(4):274-287.
- [27]Lozano, S., E. Gutiérrez, and P. Moreno. Network DEA Approach to Airports Performance Assessment Considering Undesirable Outputs[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013,37(4):1665-1676.
- [28]Fukuyama, H., and W. L. Weber. A Slacks-based Inefficiency Measure for a Two-stage System with Bad Outputs[J]. *Omega*, 2010,38(5):398-409.
- [29]Fare, R., S. Grosskopf, and C. A. Pasurka. Environmental Production Functions and Environmental Directional Distance Functions[J]. *Energy*, 2007,32(7):1055-1066.
- [30]韩晶. 中国钢铁业上市公司的生产力和生产效率——基于 DEA-TOBIT 两步法的实证研究[J]. *北京师范大学学报(社会科学版)*, 2008,(1):119-126.
- [31]齐二石,马珊珊,霍艳芳等. 基于超效率 DEA 的钢铁工业绿色规模经济[J]. *工业工程*, 2008,11(4):1-4.
- [32]焦国华,江飞涛,陈舸. 中国钢铁企业的相对效率与规模效率[J]. *中国工业经济*, 2007,(10):37-44.
- [33]夏绍模,张宗益,杨俊. 基于导向 DEA 模型多阶段求解方法对中国钢铁主营上市公司效率测定的实证分析[J]. *软科学*, 2007,21(3):37-41.
- [34]Lin, B., and X. Wang. Exploring Energy Efficiency in China's Iron and Steel Industry: A Stochastic Frontier Approach[J]. *Energy Policy*, 2014,72(9):87-96.
- [35]袁鹏,程施. 中国工业环境效率的库兹涅茨曲线检验[J]. *中国工业经济*, 2011,(2):79-88.
- [36]Jaffe, A. B., S. R. Peterson, P. R. Portney, R. N. Stavins, S. R. Peterson, and P. R. Portney. Environmental Regulation and the Competitiveness of U.S. Manufacturing: What Does the Evidence Tells[J].

- Journal of Economic Literature, 1995,33(1),132-163.
- [37]Michael, E., and C. V. D. Linde. Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship [J]. Journal of Economic Perspectives, 1995,9(4):97-118.
- [38]白雪洁,宋莹. 环境规制、技术创新与中国火电行业的效率提升[J]. 中国工业经济, 2009,(8):68-77.
- [39]许冬兰,董博. 环境规制对技术效率和生产力损失的影响分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2009,19(6):91-96.
- [40]王兵,吴延瑞,颜鹏飞. 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长[J]. 经济研究, 2010,(5):95-109.
- [41]涂正革. 环境、资源与工业增长的协调性[J]. 经济研究, 2008,(2):93-105.
- [42]Berman, E., and L. T. Bui. Environmental Regulation and Productivity: Evidence from Oil Refineries[J]. Social Review of Economics and Statistics, 2001,83(3):498-510.
- [43]Lanoie, P., M. Patry, and R. Lajeunesse. Environmental Regulation and Productivity: Testing the Porter Hypothesis[J]. Journal of Productivity Analysis, 2008,30(2):121-128.
- [44]何枫,陈荣. 公司治理及其管理层激励与公司效率——关于中国上市公司数个行业的实证研究[J]. 管理科学学报, 2008,11(4):142-152.
- [45]万伦来,朱琴. R&D投入对工业绿色全要素生产率增长的影响——来自中国工业1999—2010年的经验数据[J]. 经济学动态, 2013,(9):20-26.

Research on the Green Technical Efficiency of China's Iron and Steel Enterprises

HE Feng¹, ZHU Li-yun^{1,2}, MA Dong-dong¹, JIANG Wei^{1,3}

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Ocean College, Agricultural University of Hebei, Qinhuangdao 066003, China;

3. China Iron and Steel Industry Association, Beijing 100711, China)

Abstract: The green transformation of iron and steel industry under the restriction of energy and environment causes great concern in theoretical circles. This paper proposes the undesirable network SBM-DEA model and measures the overall and two-stage green technical efficiencies of 37 iron and steel enterprises in China during the period of 2009—2013 from the perspective of pre-iron stage and post-iron stage. And we mainly examine the impact of environmental regulation intensity on the overall green technical efficiency. The efficiency measurement results show that: both the overall and two-stage green technical efficiencies showing the inverted-U type curve feature. There is more efficiency improvement potential in the pre-iron stage from the perspective of production process. The overall green technical efficiency of iron and steel enterprises in eastern, central and western area is decreasing in turn from the perspective of regional distribution. Furthermore, the empirical analysis results indicate that the environmental regulation intensity have a non-significant negative influence on the overall green technical efficiency, and the positive correlation between resources recycling rate and the green technical efficiency is not significant. In other words, it cannot bring the win-win opportunities of simultaneous improvements in the output increase and environmental performance and the resources recycling utilization. However, the results also manifest that the R&D investment rate can promote the green technical efficiency growth significantly. Therefore, it is concluded that under the premise of strengthening environmental supervision, enforcing the environmental regulation intensity, increasing the investment of environment protection and independent R&D is the crucial way of accelerating overall green technical efficiency increase significantly.

Key Words: green technological efficiency; undesirable outputs; network DEA; environment regulation

JEL Classification: C14 L61 Q51

[责任编辑:覃毅]