

# 中国矿业能源生态效率差异及动态演进

王向前<sup>1</sup>, 夏咏秋<sup>1</sup>, 李慧宗<sup>2</sup>, 吴鑫雨<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001; 2. 南阳师范学院 计算机与信息技术学院, 河南 南阳 473061)

**摘要:** 基于中国矿业 2007—2016 年的面板数据, 使用 SBM 窗口分析法测算我国采矿业的静态能源生态效率, 通过 Malmquist-Luenberger 指数分析我国采矿业能源生态效率的动态演进特征, 研究发现: ①采矿业整体能源生态效率水平偏低, 离最优生产前沿还有 47.3% 的改进空间, 6 个分行业差异显著, 矿业投入的冗余率较高; ②矿业整体能源生态效率年均增长 8%, 技术效率和技术进步分别增长 2% 和 11%, 6 个分行业的能源生态效率都在上升, 但程度不同, 在驱动效率提升方面也各有差异。

**关键词:** 采矿业; 能源生态效率; SBM 窗口分析; Malmquist-Luenberger 指数

**中图分类号:** F062.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1002—980X(2020)9—0110—09

采矿业是中国国民经济中一个重要的先导性、基础性的产业, 为其他行业的发展提供能源、金属及非金属原材料, 在国民经济中的地位不言而喻。自然资源部中国地质调查局发布的《全球矿业发展报告 2019》数据显示, 2018 年我国矿业产值占 GDP 比例达 7%, 高于全球矿业产值占 GDP 的比例 6.9%。改革开放 40 多年来, 我国的经济社会发展水平令世界瞩目, 这些都离不开采矿业的有力支撑, 采矿业已经成为促进经济发展的重要引擎。然而, 伴随着采矿业快速发展的同时, 一系列的能源环境问题也日益凸显。我国采矿业发展主要存在能源消费高、资源利用率低、开发集约化规模化程度不够、碳排放量大、环境破坏严重等问题。据统计, 我国小型及以下矿山占比 88.4%, 但产能占比不足 40%, 这些都与资源约束型发展模式背道而驰。《全国矿产资源规划 2016—2020》明确提出要加强矿产资源节约力度, 提高其综合使用水平。据《能源发展“十三五”规划》指示, 2020 年我国能源消费总量要控制在 500 千万标煤以下, 并且单位 GDP 能耗比规划初年下降 15%。为保障矿产资源生产供应集成优化, 将传统的粗放型发展模式转变为效益型, 实现我国采矿业的健康持续绿色发展的需要已经非常迫切。为此, 对我国采矿业能源生态效率的探究和有效测度并挖掘行业差异, 正确处理能源-经济-环境之间的关系, 帮助相关部门有针对性的制定对策, 加快形成采矿业绿色生产体系, 是当前需要展开系统研究的重要课题。

## 一、文献综述

能源生态效率意指在促进经济增长的同时, 以最少的能源投入和环境投入获得最大的经济产出。能源生态效率的测度方式通常有两种: 单要素能源生态效率和全要素能源生态效率。前者仅考虑经济体的单个产出和能源投入的关系, 后者是考虑多个产出(其中包含环境污染)与所有要素投入之间的关系, 能更加全面地度量能源效率, 因而被广泛认可并使用。DEA(数据包络分析)是衡量全要素能源效率的典型方法, 由于其无需设定参数, 能够有效地将投入和产出指标多样化等优点被广泛应用于能源生态效率评价之中<sup>[1-4]</sup>。现有研究多是基于径向、角度的 DEA 模型测算各行业、各地区的能源生态效率, 忽略了投入产出变量的松弛性问题, 会造成测算结果误差。为了克服径向和角度带来的结果不准确这一问题, Tone<sup>[5]</sup>在 2001 年提出考虑松弛变量的非径向、非角度的 SBM 模型, 在 2003 年又扩展出可以处理非期望产出的 SBM 模型<sup>[6]</sup>。较之一般的 DEA 模型, 该模型既可以解决投入产出要素中的松弛性问题, 又可以较好地避免因为角度选择带来的测算

收稿日期: 2020—03—11

**基金项目:** 国家自然科学基金“基于采选充一体化的煤矿生产物流系统优化理论及建模研究”(51874003); 国家自然科学基金“基于领域本体的煤矿安全数据融合方法及应用”(51474007); 安徽省自然科学基金面上项目“基于多源信息融合的社会化标签主题识别方法研究”(1808085MG221)

**作者简介:** 王向前(1981—), 男, 安徽阜南人, 博士, 安徽理工大学经济与管理学院教授, 研究方向: 矿业管理工程、信息管理; 夏咏秋(1996—), 女, 江苏连云港人, 安徽理工大学经济与管理学院硕士研究生, 研究方向: 矿业管理工程; 李慧宗(1979—), 男, 河南南阳人, 博士, 南阳师范学院计算机与信息技术学院副教授, 研究方向: 信息管理与知识工程; 吴鑫雨(1997—), 女, 安徽阜南人, 安徽理工大学经济与管理学院硕士研究生, 研究方向: 效率评价。

结果不准确。李根等<sup>[7]</sup>、周敏等<sup>[8]</sup>、Flavia等<sup>[9]</sup>、Li和Lin<sup>[10]</sup>均使用SBM模型研究各行业的能源生态效率。Malmquist指数是常用的动态效率测算方法,但是Malmquist指数法会受到径向和角度的限制,并且不能处理“坏”产出。为此,Chung等<sup>[11]</sup>基于DDF提出了Malmquist-Luenberger(ML)生产率指数。路小静等<sup>[12]</sup>使用ML指数测度长江经济带旅游业的绿色生产率,发现技术进步贡献了绿色生产率的提升;孟祥海等<sup>[13]</sup>利用基于非期望产出的ML方法探究中国29个省份的农业绿色全要素生产率动态演变及构成分析;马骏等<sup>[14]</sup>运用ML指数分析江苏省13个城市的动态环境效率,研究发现技术进步促进了动态环境效率提升。这些研究都体现出运用Malmquist-Luenberger指数可以有效地探究中国能源生态生产率问题。

研究聚焦中国采矿业能源生态效率问题,目前学界已有一些关于采矿业能源-环境-经济的研究。Zhu等<sup>[15]</sup>使用全球数据包络分析探索了中国采矿业的绿色全要素生产率,得到结论技术进步是采矿业绿色全要素生产率增长的最大贡献者,而规模效率和管理效率阻碍采矿业绿色全要素生产率增长;Wu等<sup>[16]</sup>运用DEA讨论了中国工业各个部门的能源环境效率,其中采矿业组未实现投入产出有效,并且各细分行业之间差异显著,煤炭开采与洗选业效率最低;Li和Lin<sup>[10]</sup>使用共同前沿SBM分析法测量了比较了2003—2012年中国22个重工业和12个轻工业的能源生态效率,得到结论重工业的能源生态效率低于轻工业,其中煤炭开采和洗选业效率和非金属矿物产品制造业最差。通过梳理相关文献发现,当前从中国采矿业视角系统研究能源-经济-生态问题的较少,而将采矿业划分为6个细分行业探究各个细分行业能源生态效率的研究更是少见。仅有的研究虽然具有一定的开拓性,可是仍然存在以下不足:一是采矿业的细分行业偏少,以往研究运用的方法难以解决决策单元(decision-making unit, DMU)数量不足导致的效率评价失真问题,且没有充分考虑到投入产出的松弛量问题;二是未能有效地考察采矿业能源生态效率的动态演进及影响机制。

基于此,本文在以下3个方面进行了拓展:①数据相对较新,能够更好地反映中国采矿业能源生态效率的近期发展;②以我国采矿业2007—2016年的面板数据为样本,引入SBM模型将其与DEA窗口分析法结合,较好地解决决策单元数量偏少和松弛变量影响的问题,测算我国采矿业的静态能源生态效率;③将非期望产出CO<sub>2</sub>纳入评价体系,构建Malmquist-Luenberger指数分析,考察我国采矿业能源生态效率的动态趋势特征。

## 二、研究方法和指标说明

### (一)非期望产出SBM模型

非参数DEA模型在测度效率方面应用广泛,目前DEA方法主要有CCR、BCC、SBM等多种模型,而传统的径向模型设定投入或产出按照等比例进行缩减或者增加<sup>[17]</sup>,在评价决策单元效率时未考虑松弛量,且忽略了非期望产出的影响,会使得决策单元的真实效率值被高估<sup>[18]</sup>。Tone<sup>[5]</sup>提出SBM模型,解决了松弛变量和非期望产出存在下的效率评价问题。假定有 $n$ 个DMU,每个经济主体利用 $m$ 项投入( $i = 1, 2, \dots, m$ )取得 $s$ 项产出( $r = 1, 2, \dots, s$ ),投入和产出矩阵分别为 $X = (x_{ij}) \in R^{m \times n}$ ,  $Y = (y_{ij}) \in R^{s \times n}$ 。若本文的决策单元是DMU<sub>0</sub>,规模报酬可变,那么建立投入导向型的SBM模型如下:

$$\begin{aligned} \min p_{0s^-, \lambda} &= 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}} \\ \text{s.t. } x_{i0} &= \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + s_i^-, i = 1, 2, \dots, m \\ y_{r0} &\leq \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j, r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1, \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \\ s_i^- &\geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $p_0$ 表示效率值; $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T$ 为权重向量; $s_i^-$ 为第 $i$ 个投入的松弛量。 $p_0$ 取值在0~1。当 $p_0 = 1$ 时,说明被评价DMU强有效,位于效率前沿面,各投入松弛量为0。当 $p_0$ 接近于0时,则说明被评价DMU效率很低。

## (二) DEA 窗口分析法

运用 DEA 方法一般要求决策单元数是投入产出指标乘积的两倍及以上,并且依据截面 DEA 评价所获得的效率值不能进行跨期比较。为了解决以上问题,Charnes 等<sup>[19]</sup>提出 DEA 窗口分析法( DEA window analysis),不仅可以解决 DMU 数量不足的问题,还将同一个决策单元的不同时期作为不同的决策单元,进而可以获得更加真实的效率评价。本文的决策单元是采矿业整体及其 6 个分行业,而投入指标有 3 个,产出指标有 2 个,决策单元数量偏少,运用窗口分析法可以解决 DMU 数量不足导致的效率评价失真问题。

DEA 窗口分析法利用移动平均方法将样本区间分为若干个窗口,计算同一时间点的同一决策单元在不同窗口下的效率值并将各窗口下的效率值进行算术平均,以此作为对应决策元的效率值。假设被研究对象有  $n$  个,研究的总时间长度为  $T$ ,参考大多数研究,设定视窗宽度  $r$  为 3,通过移动平均法建立  $T-r+1$  个窗口,那么每一个窗口内有  $n \times r$  个 DMU。本文的观察期为 2007—2016 年,根据式(2),第 1 个窗口  $w_1$  为(2007, 2008, 2009),第 2 个窗口  $w_2$  为(2008, 2009, 2010),第 3 个窗口  $w_3$  为(2009, 2010, 2011),第 4 个窗口  $w_4$  为(2010, 2011, 2012),第 5 个窗口  $w_5$  为(2011, 2012, 2013),第 6 个窗口  $w_6$  为(2012, 2013, 2014),第 7 个窗口  $w_7$  为(2013, 2014, 2015),第 8 个窗口  $w_8$  为(2014, 2015, 2016)。窗口分析方法的计算公式如下:

$$\begin{aligned} w_1 &= (1, 2, \dots, r) \\ w_2 &= (2, 3, \dots, r+1) \\ &\dots \\ w_{T-r+1} &= (T-r+1, T-r+2, \dots, T) \end{aligned} \quad (2)$$

## (三) Malmquist-Luenberger 指数

根据方向距离函数来定义 Malmquist-luenberger 生产率指数, Malmquist-luenberger 需要定义相邻两个不同时期的方向性距离函数:

$$\vec{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t; g) = \sup \{ \beta : (y^t, b^t) + \beta g \in p^{t+1}(x^t) \} \quad (3)$$

其中:  $x$ 、 $y$  和  $b$  分别表示投入、期望产出和非期望产出;  $p(x)$  为产出集;  $g$  为方向向量。

根据 Chung 和 Fare<sup>[20]</sup>定义:关于  $t \sim t+1$  期的 ML 生产率指数为

$$ML_t^{t+1} = \left\{ \frac{[1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)]}{[1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; y^{t+1}, -b^{t+1})]} \times \frac{[1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)]}{[1 + \vec{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; y^{t+1}, -b^{t+1})]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ML 指数可以进一步分解为技术效率变化指数  $MLEFFCH_t^{t+1}$  和技术变化指数  $MLTECH_t^{t+1}$  的乘积,去挖掘生产率变动的主要原因,函数表达式如下:

$$ML = MLEFFCH_t^{t+1} \times MLTECH_t^{t+1} \quad (5)$$

$$MLEFFCH_t^{t+1} = \frac{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; y^{t+1}, -b^{t+1})} \quad (6)$$

$$MLTECH_t^{t+1} = \left[ \frac{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^t(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)} \times \frac{1 + \vec{D}_0^{t+1}(x^t, y^t, b^t; y^t, -b^t)}{1 + \vec{D}_0^t(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}; y^{t+1}, -b^{t+1})} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$MLEFFCH_t^{t+1}$  测度的是  $t \sim t+1$  时期技术效率生产可能性边界的改变,  $MLEFFCH_t^{t+1} = 1$  时,代表技术效率对全要素生产率增长无贡献;当  $MLEFFCH_t^{t+1} > 1$  时,代表技术效率上升并正向作用于全要素生产率;当  $MLEFFCH_t^{t+1} < 1$  时,代表技术效率下降并反向作用于全要素生产率。 $MLTECH_t^{t+1}$  测度的是  $t \sim t+1$  时期生产技术变化,当  $MLTECH_t^{t+1} > 1$  时,表示技术进步并正向作用于全要素生产率;当  $MLTECH_t^{t+1} < 1$  时,表明技术退步并反向作用于全要素增长率;当  $MLTECH_t^{t+1} = 1$  时,表明技术不变并对全要素增长率的增长无贡献。

## (四) 投入产出指标和数据处理

基于数据可得性,本文的样本时间为 2007—2016 年,研究对象为采矿业整体及 6 个细分行业。根据中华人民共和国国家统计局(NBSC)的行业分类,中国采矿业主要包含煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采业、黑色金属矿采选业、有色金属矿采选业、非金属矿采选业、开采辅助活动和其他采矿业。由于 2012 年才公布开采辅助活动的官方统计数据,为了数据统计的连贯性,所以不考虑开采辅助活动。因此,本文的采矿业包

括6个细分行业:煤炭开采和洗选业(DMU<sub>1</sub>)、石油和天然气开采业(DMU<sub>2</sub>)、黑色金属矿采选业(DMU<sub>3</sub>)、有色金属矿采选业(DMU<sub>4</sub>)、非金属矿采选业(DMU<sub>5</sub>)及其他采矿业(DMU<sub>6</sub>)。投入产出变量及数据处理见表1。

通过以上方法获得了2007—2016年采矿业分行业能源生态效率分析所需要的关键指标和数据,进行简单的描述统计,具体结果见表2。从表2中可以看出各行业之间的投入产出变量存在较大差异,两极分化现象明显。CO<sub>2</sub>指标的离散程度较大,工业销售产值、能源消费总量和固定资产净值3个指标的离散程度相近,而从业人员平均人数指标的离散程度最小。

表1 中国矿业能源生态效率投入产出指标

| 一级指标 | 二级指标  | 三级指标                    | 数据处理                          |
|------|-------|-------------------------|-------------------------------|
| 投入指标 | 劳动力   | 从业人员平均人数(万人)            | 由于2012年未公布行业就业人员数据,采用插值法补充缺失值 |
|      | 资本    | 固定资产净值(亿元)              | 以2007年为基期,使用固定资产投资价格指数进行平减    |
|      | 能源    | 能源消费总量(万吨标准煤)           | 采矿业各行业折算成标准煤之后的能源消费总量         |
| 产出指标 | 期望产出  | 工业销售产值(亿元)              | 使用分行业工业品出厂价格指数进行平减为2007年不变价   |
|      | 非期望产出 | CO <sub>2</sub> 排放量(万吨) | 使用IPCC公布的方法来测算                |

注:所有数据来源于《中国工业统计年鉴》《中国价格统计年鉴》及《中国统计年鉴》。

表2 样本投入产出变量描述性统计(2007—2016年)

| 投入产出指标              | 单位   | 最小值        | 最大值         | 平均值         | 标准差        |
|---------------------|------|------------|-------------|-------------|------------|
| 从业人员(L)             | 万人   | 0.19       | 529.18      | 125.04      | 167.99     |
| 能源消费总量(E)           | 万吨标煤 | 126.51     | 14179.99    | 3166.93     | 3717.28    |
| 固定资产净值(I)           | 亿元   | 1.84       | 13722.42    | 3807.54     | 4448.16    |
| 工业销售产值(S)           | 亿元   | 10.23      | 21389.72    | 6503.34     | 5777.09    |
| CO <sub>2</sub> (C) | 万吨   | 1131485.00 | 30326071.00 | 11662897.00 | 7613113.00 |

三、实证分析

(一)采矿业静态能源生态效率分析

基于非期望产出的窗口分析SBM模型,对我国2007—2016年的采矿业及其6个细分行业在8个窗口下的能源生态效率及其历年均值进行具体测算,各个细分行业的能源生态效率是其在重叠视窗内的能源生态效率均值。鉴于篇幅有限,本文以黑色金属矿采选业为例,计算结果见表3,采矿业其他细分行业的计算结果与表3类似。

从表3可以看出,2007—2016年间,黑色金属矿采选业的能源生态效率值较高,2007—2012年在波动式上升,2013年开始实现了DEA有效,表现出黑色金属矿采选业在资源与环境的约束下实现了经济效益和生态效益的平衡发展。表4进一步分析了矿业整体及其6个细分行业的能源生态效率水平,以评价矿业发展的投入产出效益。

表3 2007—2016年我国黑色金属矿采选业8个窗口能源生态效率

| 黑色金属矿采选业 | 2007年 | 2008年 | 2009年 | 2010年 | 2011年 | 2012年 | 2013年 | 2014年 | 2015年 | 2016年 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $w_1$    | 0.698 | 0.743 | 1.000 |       |       |       |       |       |       |       |
| $w_2$    |       | 0.742 | 1.000 | 1.000 |       |       |       |       |       |       |
| $w_3$    |       |       | 0.975 | 1.000 | 1.000 |       |       |       |       |       |
| $w_4$    |       |       |       | 0.785 | 0.839 | 1.000 |       |       |       |       |
| $w_5$    |       |       |       |       | 0.812 | 1.000 | 1.000 |       |       |       |
| $w_6$    |       |       |       |       |       | 0.949 | 1.000 | 1.000 |       |       |
| $w_7$    |       |       |       |       |       |       | 1.000 | 1.000 | 1.000 |       |
| $w_8$    |       |       |       |       |       |       |       | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 均值       | 0.698 | 0.742 | 0.992 | 0.928 | 0.884 | 0.983 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |



表 4 2007—2016 年我国矿业能源生态效率

| 行业               | 2007 年 | 2008 年 | 2009 年 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 均值    |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| DMU <sub>1</sub> | 0.457  | 0.755  | 0.538  | 0.806  | 0.945  | 1.000  | 0.728  | 0.564  | 0.357  | 0.364  | 0.651 |
| DMU <sub>2</sub> | 1.000  | 0.787  | 1.000  | 0.919  | 0.953  | 0.575  | 0.508  | 0.473  | 0.506  | 0.523  | 0.724 |
| DMU <sub>3</sub> | 0.698  | 0.742  | 0.992  | 0.928  | 0.884  | 0.983  | 1.000  | 1.000  | 1.000  | 1.000  | 0.923 |
| DMU <sub>4</sub> | 1.000  | 0.869  | 1.000  | 0.917  | 0.870  | 0.878  | 0.927  | 0.876  | 0.905  | 0.911  | 0.915 |
| DMU <sub>5</sub> | 0.600  | 0.622  | 0.716  | 1.000  | 1.000  | 0.846  | 0.959  | 0.844  | 0.808  | 1.000  | 0.839 |
| DMU <sub>6</sub> | 1.000  | 0.776  | 1.000  | 0.885  | 0.493  | 0.897  | 0.462  | 1.000  | 0.892  | 0.523  | 0.793 |
| 矿业整体             | 0.508  | 0.517  | 0.645  | 0.649  | 0.584  | 0.530  | 0.456  | 0.444  | 0.464  | 0.475  | 0.527 |

由表 4 可见,2007—2016 年,我国采矿业整体的能源生态效率水平不高,离最优生产前沿还有 47.3% 的改进空间,各行业均值依次为 0.651、0.724、0.923、0.915、0.839、0.793,6 个细分行业差异显著。从 6 个行业来看,研究期内黑色金属矿采选业能源生态效率最高,并且逐年接近有效生产前沿面,2013 年之后实现了 DEA 有效,表明黑色金属矿采选业生产规模合理、技术水平较高,各项投入要素实现了最优产出。这可能由于近些年黑色金属矿采选业内企业兼并重组活动较为活跃以及得益于钢铁行业产能去化的缘故。其次是有色金属矿采选业、非金属矿采选业,二者能源生态效率每一年都高于采矿业行业整体水平。进入 21 世纪以来,我国有色金属矿采选业快速发展,加大了技术方面的投资,积极响应国家去产能的政策,实现了高效率的资源开发利用,而 2008 年下半年国际金融危机的爆发使有色金属行业下调产品价格,减少产量,国家出台《有色金属产业调整和振兴规划》推进产业整合提高有色金属产业的资源配置效率。非金属矿采选业在 2007—2009 年间能源生态效率较低,表明该段期间内我国非金属矿物深加工能力较弱,产品附加值极低。2010 年之后一直处于较高前沿,一方面是由于行业投资规模的扩大使得非金属矿产业新技术和新设备日臻成熟,提高了产业技术含量;另一方面是由于我国鼓励建材行业综合利用各种固体废弃物代替天然矿物,促进了节能减排。排名第四的是其他采矿业,能源生态效率值波动幅度较大。其他采矿业指对地热资源、矿泉水资源以及其他未列明的自然资源的开采活动。我国地热资源开采与管理水平较高。矿泉水资源十分丰富且开采条件优越,产品生产技术起点高,但是由于企业规模小,行业集中度低、资源整合不完善等问题造成了严重的资源浪费。排名最后的是石油和天然气开采业以及煤炭开采和洗选业,二者的能源生态效率值总体水平在采矿业中最低。多年来,我国采取的是“有油快流”的油气资源开发政策,导致油气产业重产量轻质量效益。煤炭行业长期的粗放式开采不仅造成了资源的浪费还带来了严重的环境污染问题。尽管中国政府出台了一系列有针对性的文件明确提出加强煤炭绿色开发和高效利用,但是煤炭开采和洗选业由于行业去产能、企业科研实验室等研发机构技术产出的时滞等原因尚未实现高效的投入产出。

## (二)投入产出冗余率分析

表 5 给出了我国矿业整体及 6 个细分行业投入和非期望产出的冗余率,可以为提高采矿业的能源生态效率提供参考。从行业整体来看,冗余率最高的是劳动投入,达到 49.3%,能源投入和资本投入的冗余率也较高,均为 46.3%。相比之下,CO<sub>2</sub> 排放的冗余率较低,仅为 8.2%。分行业来看,煤炭开采和洗选业的能源投入冗余率最高,达到了 41.5%,是整个矿业行业中最高的。煤炭开采和洗选业是高耗能行业,重型工业结构还未彻底实现转型。但煤炭开采和洗选业的 CO<sub>2</sub> 排放冗余率是矿业中最低的,仅为 3.6%,说明煤炭开采和洗选业能源生态效率值低下的主要原因是投入过高,存在严重的资源浪费。石油和天然气开采业的变量冗余率与矿业整体类似,劳动投入、能源投入、资本投入和 CO<sub>2</sub> 排放的冗余率分别为 41.8%、11.8%、29.1% 和 10.5%,其劳动投入冗余率在分行业中最高,2012 年开始处于高冗余率,介于 68%~80%。黑色金属矿采选业是 6 个行业中表现最好的行业,投入产出冗余率都不高,能源投入冗余率最低,高质量的人力资本配置和能源利用水平使黑色金属矿采选业成为我国采矿业绿色可持续发展的示范行业。紧随其后的是有色金属矿采选业,劳动投入和资本投入的冗余率在各行业中最低,分别是 2.2% 和 4.2%,但 CO<sub>2</sub> 排放的冗余率在各行业中排名第二(16.1%),能源投入的冗余率在各行业中排名第三(18.8%),说明有色金属矿采选业能源投入过剩,未实现充分利用,存在大量的浪费。非金属矿采选业投入产出变量的冗余率在 6 个细分行业中都不高,其中劳动投入冗余最低,仅有 2.7%,自 2010 年起连续 7 年实现了劳动力零冗余。其他采矿业的资本投入和 CO<sub>2</sub> 排放冗余率在整个行业中最高,并且可以通过表 4 可见,在 2011 年、2013 年和 2016 年这 3 个年份,二者的冗余率几乎接近 100%,由此可见,其他采矿业存在着大量的资本闲置或者未能实现充分有效利用,由此节能减排技术和产品没有投入到生产中,造成大量的 CO<sub>2</sub> 排放。从动态变化来看,我国采矿业投入和“坏”产出的冗余率在

2007—2010年呈现下降趋势,2010—2014年呈现上升趋势,2014—2016年呈现下降趋势,这与前面得到的采矿业能源生态效率值变动情况保持一致。政府应根据各行业的情况制定差别化政策,有望提高我国矿业的能源生态效率水平。

表5 采矿业能源生态效率投入产出变量冗余率(2007—2016年) 单位:%

| 行业               | 变量 | 2007年 | 2008年 | 2009年 | 2010年 | 2011年 | 2012年 | 2013年 | 2014年 | 2015年 | 2016年 | 平均   |
|------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| DMU <sub>1</sub> | L  | 34.0  | 19.7  | 28.5  | 7.6   | 1.4   | 0.0   | 19.9  | 35.7  | 57.5  | 59.2  | 26.4 |
|                  | E  | 69.1  | 27.5  | 57.4  | 29.0  | 9.5   | 0.0   | 31.4  | 48.5  | 71.9  | 70.9  | 41.5 |
|                  | I  | 59.8  | 26.1  | 52.7  | 21.4  | 5.7   | 0.0   | 30.4  | 46.5  | 63.6  | 60.8  | 36.7 |
|                  | C  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 5.1   | 7.9   | 12.3  | 10.3  | 3.6  |
| DMU <sub>2</sub> | L  | 0.0   | 20.4  | 0.0   | 12.4  | 9.9   | 68.7  | 76.6  | 79.3  | 75.8  | 75.0  | 41.8 |
|                  | E  | 0.0   | 19.3  | 0.0   | 4.2   | 2.7   | 20.9  | 18.5  | 21.8  | 15.6  | 15.3  | 11.8 |
|                  | I  | 0.0   | 24.1  | 0.0   | 7.7   | 1.5   | 37.9  | 52.6  | 57.0  | 56.8  | 52.9  | 29.1 |
|                  | C  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 3.4   | 18.8  | 26.0  | 29.4  | 27.6  | 10.5 |
| DMU <sub>3</sub> | L  | 9.8   | 6.1   | 0.0   | 5.3   | 8.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 2.9  |
|                  | E  | 34.3  | 34.9  | 1.3   | 9.9   | 13.1  | 4.9   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 9.8  |
|                  | I  | 46.5  | 36.3  | 1.2   | 6.3   | 13.8  | 0.2   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 10.4 |
|                  | C  | 47.4  | 35.3  | 0.0   | 5.4   | 14.5  | 3.6   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 10.6 |
| DMU <sub>4</sub> | L  | 0.0   | 5.0   | 0.0   | 6.2   | 5.2   | 1.6   | 0.0   | 0.9   | 0.2   | 2.6   | 2.2  |
|                  | E  | 0.0   | 30.4  | 0.0   | 14.7  | 24.4  | 30.5  | 19.6  | 23.1  | 22.8  | 22.7  | 18.8 |
|                  | I  | 0.0   | 4.0   | 0.0   | 4.0   | 9.5   | 4.5   | 7.6   | 8.4   | 2.8   | 1.4   | 4.2  |
|                  | C  | 0.0   | 13.9  | 0.0   | 7.6   | 19.5  | 23.9  | 16.2  | 25.9  | 29.3  | 25.1  | 16.1 |
| DMU <sub>5</sub> | L  | 12.4  | 14.3  | 0.2   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 2.7  |
|                  | E  | 55.5  | 53.0  | 45.2  | 0.0   | 0.0   | 28.5  | 6.6   | 28.3  | 38.7  | 0.0   | 25.6 |
|                  | I  | 52.3  | 46.1  | 26.8  | 0.0   | 0.0   | 17.8  | 5.6   | 18.5  | 18.8  | 0.0   | 18.6 |
|                  | C  | 23.7  | 12.1  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 12.0  | 1.7   | 5.9   | 0.7   | 0.0   | 5.6  |
| DMU <sub>6</sub> | L  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 35.0  | 0.0   | 24.1  | 0.0   | 0.0   | 1.7   | 6.1  |
|                  | E  | 0.0   | 27.4  | 0.0   | 2.6   | 18.7  | 4.5   | 38.6  | 0.0   | 4.5   | 43.0  | 13.9 |
|                  | I  | 0.0   | 39.8  | 0.0   | 31.8  | 98.4  | 26.4  | 98.6  | 0.0   | 27.9  | 98.3  | 42.1 |
|                  | C  | 0.0   | 39.3  | 0.0   | 32.3  | 98.9  | 26.5  | 99.1  | 0.0   | 29.1  | 98.9  | 42.4 |
| 行业整体             | L  | 50.3  | 45.3  | 44.8  | 48.7  | 36.8  | 50.8  | 53.2  | 54.8  | 53.8  | 54.7  | 49.3 |
|                  | E  | 44.7  | 48.5  | 26.6  | 25.2  | 49.2  | 47.9  | 55.6  | 56.2  | 55.1  | 53.7  | 46.3 |
|                  | I  | 52.6  | 51.0  | 35.1  | 31.5  | 38.9  | 42.3  | 54.4  | 55.9  | 51.9  | 49.0  | 46.3 |
|                  | C  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 2.0   | 4.3   | 14.1  | 20.4  | 21.5  | 20.1  | 8.2  |

(三)采矿业动态能源生态效率分析

基于SBM模型的Malmquist-Luenberger指数分解法测算2007—2016年我国矿业能源生态效率的变动情况及因素分解,结果如图1和图2所示,其中ML代表动态能源生态效率变化指数;EC代表技术效率变化指数;TC代表技术进步变化指数。

2007—2016年,我国采矿业整体动态能源生态效率的平均值为1.08,即能源生态效率年均增长8%,技术效率和技术进步分别增长-2%和11%,采矿业能源生态效率呈现上升趋势是由于技术进步的促进作用大于技术效率的阻碍作用。从单个行业来看,研究期内6个细分行业的能源生态效率都在上升,但程度不同,表明自国家提倡高效清洁绿色开采以来,各行业都在努力践行节能减排的绿色发展模式。在驱动效率提升方

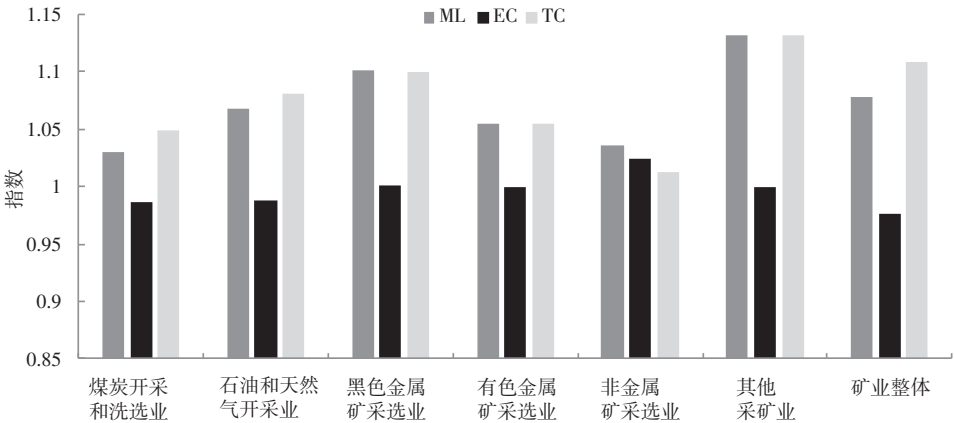


图1 我国矿业分行业能源生态效率动态变化及分解指数(2007—2016年)

面,煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采业的能源生态效率的变化与整个矿业走势较为一致,均是由于技术进步的促进作用大于技术效率的阻碍作用。需要说明的是,技术效率增长率为负并非资源配置效率、管理能力退步,而是资源配置效率、管理能力速度有所减慢。黑色金属采选业、有色金属采选业、非金属矿采选业和其他采矿业均是由于技术进步和技术效率的共同促进作用而实现能源生态效率增长。

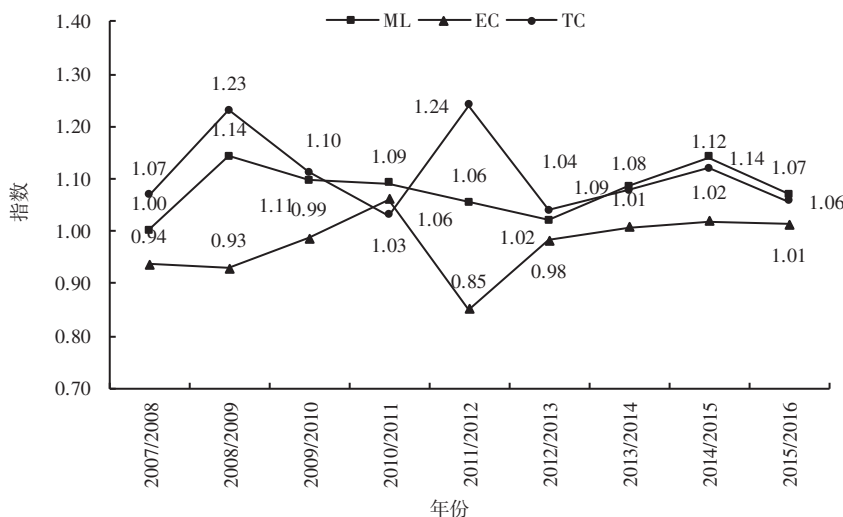


图2 采矿业动态能源生态效率及分解指数的变动趋势(2007—2016年)

由图2可知,研究期内采矿业能源生态效率一直是增长状态,根据因素分解情况可分为4个阶段。第一个阶段为2007—2010年,此阶段的EC一直小于1但在逐渐增长,TC一直大于1,技术进步的促进作用大于技术效率的抑制作用,所以采矿业能源生态效率实现增长。2008年爆发国际金融危机,国家投资4万亿刺激经济,之后一段时间我国采矿业技术进步得到显著提升,但忽视了资源有效利用和节能减排。第二个阶段是2010—2011年,这个阶段的TC和EC都大于1,两者共同促进了采矿业能源生态效率进步。第三个阶段是2011—2013年,这个阶段的TC依然一直大于1,EC小于1,技术进步的促进作用大于技术效率的抑制作用,所以采矿业能源生态效率实现增长。第四个阶段是2013—2016年,这个阶段的TC和EC都大于1,两者共同促进了采矿业能源生态效率进步。其主要原因在于“十二五”规划前期,国家大力发展采矿业,这一时期强调经济发展速度从而忽视了规模效益问题,因此采矿业技术效率出现下降态势。2013年之后,经济发展进入“新常态”时期,面对资源环境压力以及经济实力增强,开始转变发展理念,加强资源节约和环境保护,采矿业的发展开始注重质量和效益。再加上国家近些年来出台的相关政策《矿产资源开发规划》,加快采矿业产业结构调整,关停一些资源利用率低的企业,加大环境污染治理力度,促使采矿业技术效率的进步。

#### 四、结论与启示

本文利用中国采矿业2007—2016年的面板数据,基于SBM窗口分析法测算我国采矿业的静态能源生态效率,通过Malmquist-Luenberger指数分析我国采矿业能源生态效率的动态演进特征,得出两个主要结论。

(1)研究期内我国采矿业整体能源生态效率水平偏低,离最优生产前沿还有47.3%的改进空间,6个细分行业差异显著,能源生态效率排名依次是黑色金属矿采选业、有色金属矿采选业、非金属矿采选业、其他采矿业、石油和天然气开采业以及煤炭开采和洗选业。投入的冗余率较高,矿业优化资源利用的潜力巨大。

(2)2007—2016年,我国采矿业整体动态能源生态效率的平均值为1.08,即能源生态效率年均增长8%,技术效率和技术进步分别增长-2%和11%。从单个行业来看,研究期内6个细分行业的能源生态效率都在上升,但程度不同。在驱动效率提升方面,煤炭开采和洗选业、石油和天然气开采业的能源生态效率的变化与整个矿业走势较为一致,均是由于技术进步的促进作用大于技术效率的阻碍作用。黑色金属采选业、有色金属采选业、非金属矿采选业和其他采矿业均是由于技术进步和技术效率的共同促进作用而实现能源生态效率增长。

本研究既弥补了我国矿业能源生态效率研究的不足,有助于相关部门针对性地制定对策,加快形成采矿

业绿色生产体系,拓展了窗口分析DEA模型测算、分析效率值的研究成果,为促进其他行业进行能源生态效率分析做出了适宜的参考。据此,提出如下政策建议。

(1)我国矿业劳动力已严重冗余,矿企业要着力精简机构人员,完善人力制度建设。在矿业4.0时代,紧跟“一带一路”矿业高校联盟的步伐,储备具有国际视野的高素质复合型人才,探索跨国跨境流动人才培养机制,培养一批矿业精英人才队伍。

(2)矿业投资未能充分有效地发挥作用,对此,矿业部门应该将投资部分转移到生态创新领域,扩大绿色开采、环境治理技术资本的使用规模。实行第三方监督制度,落实资金的每一项用处,监督矿企业务必落实R&D投入大于上年度主营业务收入的1.5%的政策要求。

(3)矿业各行业需要探索循环-绿色-综合的资源开发与使用模式,在全面考虑了能耗、人力、环境等要素之后探索效益型开采模式,提高能源利用效率。开拓新的矿产品品种,实现由初级产品向高级产品的延伸。对于绿色可循环使用的优质矿产品,政府可以通过减免税收、申报专利等手段鼓励企业开发。

(4)环境保护需要协调各方力量,统筹兼顾每一份子。一方面,政府通过出台环境规制政策、建立环境监管机构等手段督促企业落实绿色矿业的要求;另一方面,企业应当在矿山所在地宣传共建、共享的办矿理念,与当地居民加强合作,建立矿区资源环境管理共赢模式。

(5)针对矿业能源生态效率差异显著日趋严重这一现实,政府应采取个体扶持、重点突破的策略,集中改进非金属矿采选业、有色金属矿采选业等碳排放较高的行业,加大行业间的能源技术交流,通过技术优势互补、管理优化学习实现矿业整体共同进步。

(6)目前矿业行业“信息孤岛”、重硬件轻软件的现象异常突出,这些都阻碍了行业资源配置效率和管理能力水平的进步,为此,矿企需要与管理研究机构加大合作,定期组织管理人员参加绿色矿山培训,大力发展互联网+矿业,实现管理创新,比如,由企业牵头,与高校、科研院校共同承担绿色技术研发项目,促使资源的合理配置,改变目前过分依赖技术进步的经济模式,最终推动矿业能源生态效率提高。

### 参考文献

- [1] 陶宇,申俊,杨薇.空气污染视角下中国工业能源环境效率的空间效应及其影响因素研究[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(6):107-117.
- [2] 刘朝,朱于珂,覃昌雄.公路交通能源环境效率与能源回弹效应——基于空间溢出效应的研究[J].技术经济,2019,38(4):114-128.
- [3] 冯玮,姚西龙.基于DEA四阶段的我国工业绿色全要素能源效率测度[J].数学的实践与认识,2018,48(23):24-37.
- [4] 王晓岭,武春友.“绿色化”视角下能源生态效率的国际比较——基于“二十国集团”面板数据的实证检验[J].技术经济,2015,34(7):70-77.
- [5] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(1): 498-509.
- [6] TONE K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks-based measure(SBM) approach[R]. GRIPS Research Report Series. Tokyo: Japanese Operational Research Institute, 2003: 44-45.
- [7] 李根,刘家国,李天琦.考虑非期望产出的制造业能源生态效率地区差异研究——基于SBM和Tobit模型的两阶段分析[J].中国管理科学,2019,27(11):76-87.
- [8] 周敏,王腾,严良,等.财政分权、经济竞争对中国能源生态效率影响异质性研究[J].资源科学,2019,41(3):532-545.
- [9] FILAVIA D C C, MARIANO E B, REBELATTO D A D N. Efficiency in Brazil's industrial sectors in terms of energy and sustainable development[J]. Environmental Science & Policy, 2014, 37: 50-60.
- [10] LI J, LIN B Q. Ecological total-factor energy efficiency of China's heavy and light industries: Which performs better?[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 83-94.
- [11] CHUNG Y H, FARE R, GROSSKOPF S. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach[J]. Journal of Environmental Management, 1997, 51(3): 229-240.
- [12] 路小静,时朋飞,邓志伟,等.长江经济带旅游业绿色生产率测算与时空演变分析[J].中国人口·资源与环境,2019,29(7):19-30.
- [13] 孟祥海,周海川,杜丽永,等.中国农业环境技术效率与绿色全要素生产率增长变迁——基于种养结合视角的再考察[J].农业经济问题,2019(6):9-22.
- [14] 马骏,李夏,张忆君.江苏省环境效率及其影响因素研究——基于超效率SBM-ML-Tobit模型[J].南京工业大学学报



- (社会科学版), 2019, 18(2): 71-80, 112.
- [15] ZHU X H, CHEN Y, FENG C. Green total factor productivity of China's mining and quarrying industry: A global data envelopment analysis[J]. Resources Policy, 2018, 57: 1-9.
- [16] WU J, LI M J, ZHU Q Y, et al. Energy and environmental efficiency measurement of China's industrial sectors: A DEA model with non-homogeneous inputs and outputs[J]. Energy Economics, 2019, 78: 468-480.
- [17] COOPER W W, SEIFORD L M, ZHU J. A unified additive model approach for evaluating inefficiency and congestion with associated measures in DEA[J]. Socioeconomic Planning Sciences, 2000, 34(1): 1-25.
- [18] CHANG Y T, ZHANG N, DANA O D, et al. Environmental efficiency analysis of transportation system in China: A non-radial DEA approach[J]. Energy Policy, 2013, 58: 277-283.
- [19] CHARNES A, CLARK C T, COOPER C W, et al. A developmental study of data envelopment analysis in measuring the efficiency of maintenance units in the U. S. air forces[J]. Annals of Operations Research, 1985, 2(1): 95-112.
- [20] CHUNG Y, FARE R. Productivity and undesirable outputs: A directional distance function approach[J]. Microeconomics, 1995, 51(3): 229-240.
- [21] 李占风, 张建. 资源环境约束下中国工业环境技术效率的地区差异及动态演变[J]. 统计研究, 2018, 35(12): 45-55.
- [22] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories volume[EB/OL]. (2006-12-20)[2019-11-20]. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/Methodology-reports.htm>.

## Differences and Dynamic Evolution of Energy Eco-efficiency in China's Mining Industry

Wang Xiangqian<sup>1</sup>, Xia Yongqiu<sup>1</sup>, Li Huizong<sup>2</sup>, Wu Xinyu<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

2. School of Computer and Information Technology, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, Henan, China)

**Abstract:** Based on panel data of China's mining industry from 2007 to 2016, SBM window analysis is used to calculate the static energy eco-efficiency of China's mining industry, and the dynamic evolution characteristics of energy eco-efficiency of China's mining industry are analyzed by Malmquist-Luenberger index. The results show as follows. The overall energy eco-efficiency level of the mining industry is low, and there is still 47.3% room for improvement from the optimal production front. The energy eco-efficiency values of 6 subsectors are significantly different. The redundancy rate of mining investment is high. The overall energy eco-efficiency of the mining industry has an annual growth rate of 8%, and the technological efficiency and technological progress have increased by -2% and 11% respectively. Energy eco-efficiency is rising in all six subsectors with different degrees, and the six subsectors also differ in driving efficiency improvement.

**Keywords:** China's mining industry; energy eco-efficiency; SBM window analysis; Malmquist-Luenberger index