

引用格式:于立宏,王艳,陈家宜.考虑环境和代际负外部性的中国采矿业绿色全要素生产率[J].资源科学,2019,41(12):2155-2171. [Yu L H, Wang Y, Chen J Y. Green total factor productivity of Chinese mining industries considering negative intergenerational and environmental externalities[J]. Resources Science, 2019, 41(12): 2155-2171.] DOI: 10.18402/resci.2019.12.01

考虑环境和代际负外部性的中国采矿业绿色全要素生产率

于立宏,王 艳,陈家宜

(华东理工大学商学院,上海 200237)

摘 要:中国采矿业具有代际负外部性和环境负外部性特征,但传统的全要素生产率不考虑负外部性影响,而现有绿色全要素生产率测算也仅考虑环境污染,难以真实衡量采矿业的效率与绿色技术进步。本文构建了考虑双重负外部性的绿色全要素生产率测度框架,基于2005—2015年采矿业的省级面板数据测算其变动率,并将绿色全要素生产率分解为技术进步、规模报酬、代际负外部性、环境负外部性等,以考察其关键影响因素和传导机制。结果显示:①考虑环境和代际双重负外部性的绿色全要素生产率普遍低于传统全要素生产率的结果。②采矿业的绿色全要素生产率均有显著增长,其中,黑色金属开采业增速最快,其次为煤炭开采业和有色金属开采业,油气开采业最低。③代际和环境负外部性因素对绿色全要素生产率皆呈现抑制作用,但对不同产业的抑制程度存在异质性。环境负外部性对煤炭开采业和有色金属开采业的绿色全要素生产率具有较高的抑制作用,而代际负外部性对油气开采业和黑色金属开采业的抑制作用则高于其他采矿业。

关键词:采矿业;绿色全要素生产率;代际负外部性;环境负外部性

DOI :10.18402/resci.2019.12.01

1 引言

采矿业作为上游部门,为下游加工业提供基础原材料,在推动中国经济高速增长中起到举足轻重的作用。改革开放40年来,中国采矿业实现了快速增长和结构优化。截至2016年,中国规模以上采矿企业约1.25万家,产值4.62万亿元,占全部工业企业总产值的比重为3.3%,占主营业务收入的比重为4.1%^[1]。中国采矿企业的规模结构也在不断优化,集约化程度不断提升,平均资产收益率普遍高于工业平均水平,劳动生产率整体呈现上升趋势。

然而,中国采矿业也长期存在过度进入、产能过剩等问题,因过度开采导致的环境负外部性与代际负外部性问题非常突出,致使资源耗竭和生态环境恶化加剧^[2]。根据中国环境统计年鉴的数据,采矿业产生的固体废弃物是工业固体废弃物的主要

来源,在2005—2016年间平均占比达到40%以上,2012年甚至高达48.8%。同时,40年来中国矿产资源探明储量增长十分缓慢,但消费增速却远高于世界平均水平,采矿业的可持续发展面临严峻挑战。2009年,煤炭基础储量开始出现负增长,导致煤炭资源的可开采年限快速下降,2011年仅为67.6年,远低于世界平均水平;而石油储采比仅为15年左右;铅、锌可开采年限低于10年。

在中国经济向高质量发展转型的重要时期,《中共中央国务院关于加快推进生态文明建设的意见》^[3]要求“把资源消耗、环境损害、生态效益等指标纳入经济社会发展综合评价体系”。因此,采矿业必须加快绿色技术进步,缓解资源和环境约束,推动产业转型升级,实现绿色发展。本文定义采矿业绿色全要素生产率为同时考虑环境负外部性和代

收稿日期:2019-05-21 修订日期:2019-10-05

基金项目:国家自然科学基金项目(71773029)。

作者简介:于立宏,女,黑龙江伊春人,教授,博士生导师,研究方向为政府规制、资源环境经济学。E-mail: ylhcmu@vip.sina.com

际负外部性的全要素生产率,即要求其将双重负外部性引致的社会成本内部化,准确度量其真实的全要素生产率水平。唯有如此,绿色全要素生产率才能用以衡量经济、资源与环境绩效的共赢状态。

研究表明,依赖资源消耗或重污染产业的国家,生产率往往被高估,而注重资源高效利用或污染减排的国家,生产率则往往被低估^[4]。也就是说,如果遗漏环境污染排放和自然资源使用因素,容易带来误导和决策失误。这是由于传统的全要素生产率并未考虑资源与环境的影响,因而无法准确考察经济增长和产业发展所付出的全部代价。近年,很多学者通过考虑环境负外部性测算了绿色全要素生产率^[5-7],但这些文献缺乏针对采矿业的研究。本文重新定义了绿色全要素生产率概念,并通过构建考虑双重负外部性的模型进行了测度。此外,本文还研究了全部采矿业子行业的绿色全要素生产率,并通过对比分析,试图把握这些产业的共性与异质性,以便更为精准地为政府制定政策提供依据。具体地,本文将资源、环境、经济增长纳入一个统一的分析框架,从超越对数成本函数出发,通过核算两种负外部性成本,并基于修正索洛余值模型,构建了一个考虑双重负外部性的绿色全要素生产率测度框架,全面评估采矿业的绿色技术进步水平。

2 文献综述

国内外关于绿色全要素生产率的研究经过了从单纯考虑环境负外部性到同时考虑资源耗减的转变,在研究方法上不断创新,这其中涉及到负外部性在全要素生产率测算过程中的应用。因此,本文的文献综述涉及代际负外部性与环境负外部性的概念、绿色全要素生产率的内涵和全要素生产率的研究方法以及涉及相关产业的实证研究。

可耗竭资源产生的代际负外部性概念源于Hotelling^[8]的研究,后来由Arrow等^[9]、Solow^[10]等加以深化,其涵义是:作为“交易内部人”的一代人的资源开采成本的增加被强加于作为“交易外部人”的未来若干代人身上,而这种成本增加并未由产生成本的内部人加以偿付,从而损害了代际公平。这一负外部性是矿产资源开采业所独有的特性。环境负外部性被定义为:生产和消费过程中消费者效用和企业成本所受到的环境影响并未得到补偿的部

分^[11],广泛存在于所有产业。实际上,两种负外部性都可被理解为生产过程中私人成本和社会成本的货币化差额,这导致市场均衡产量大于社会最优产量,均衡价格小于最优价格,由此造成社会福利净损失。然而,企业缺乏主动将负外部性成本内部化的动机,在一定程度上使得其生产率容易被高估。

绿色全要素生产率本质上是实现资源节约利用、污染排放减少和劳动生产率提高的过程^[12]。优化绿色全要素生产率是对环境全要素生产率的持续改善^[13]。最初的绿色全要素生产率是将污染排放作为产出,测算考虑环境因素的全要素生产率。诸多学者在测算区域和行业层面全要素生产率的基础上对经济发展方式和发展绩效进行评价^[14-16]。随着全社会对资源与环境约束的重视,不少学者研究包含资源及环境要素的绿色全要素生产率测算框架,以反映资源投入和环境污染给生产率带来的影响。同时,绿色全要素生产率还与不同资源消耗程度和污染程度有关,如果遗漏环境污染排放、资源投入或自然资源使用因素,容易产生测算偏差^[3-6]。此外,绿色发展方式注重低能源消耗、低污染排放,也需要在全要素生产率分析框架中纳入能源消耗和环境污染因素^[5,6]。目前,大部分研究支持资源与环境问题对绿色全要素生产率具有制约作用的结论^[17-19]。

在采矿业全要素生产率研究方面,现有成果不多,主要可分为两类:一类是在研究工业全要素生产率时涉及采矿业,但这类研究的重点放在提升生产率的轨迹精度和微观分解上,仅将采矿业作为样本的一部分,且没有考虑双重负外部性。与工业全要素生产率相比,煤炭和石油天然气行业全要素生产率普遍较低,远低于工业平均水平^[20,21],且采矿业全要素生产率增长率总体呈现逐年递减的态势^[22]。然而,若考虑资本与劳动投入对经济增长的贡献,采矿业全要素生产率的增速则是最快的^[23];另一类是针对某个采矿业的绿色全要素生产率研究,但这类研究要么仅考虑环境因素的影响,要么仅考虑资源耗减因素。当考虑环境负外部性时,工业绿色全要素生产率低于传统测量方法,特别是采矿业受到的影响非常明显。其中,黑色金属、有色金属以及非金属开采业的全要素生产率出现下降^[24];对煤炭企业的研究发现,环境污染甚至导致全要素生产率出现负增长^[25]。当考虑资源耗减因素时,Rodriguez

等^[26]发现,西班牙煤炭业的全要素生产率下降了1.3%;王克强等^[27]则发现,忽略资源耗减因素,会导致中国能源产业的全要素生产率被低估。而本文不仅考虑了环境负外部性,还特别考虑了资源耗竭性以及由此带来的代际负外部性成本,可以更为准确地衡量采矿业的绿色全要素生产率。

在研究方法上,全要素生产率的测度方法还在不断发展之中。基于不同研究对象和样本数据的特点,常用方法包括增长核算法和生产前沿面法,其中,增长核算法是以经济增长模型为基础,在索洛余值法上发展而来的,适用于各种样本数据类型,但在投入要素数据的加总和处理上存在争议。生产前沿面法分为确定性生产前沿模型法和随机前沿生产函数法,并逐渐演化出数据包络法(DEA)、Malmquist指数法和随机前沿法(SFA)等。DEA方法通过对决策单元的投入产出指标进行评价,可以不用估计具体生产函数及其所涉及的参数,即可确定相对有效的生产前沿面,因而适用于多投入多产出的研究,具有广泛的应用性。然而,其效率的计算容易产生测量误差,再加上遗漏变量问题,会对前沿面的确定产生较大影响,导致结果偏移。与DEA的基本思路类似,SFA估计生产边界的方法是由Aigner等^[28]基于Afriat^[29]提出的确定性生产前沿改进而来,该方法考虑了随机误差对经济增长的影响,提高了结果的准确性,但需要收集大量样本以及定义生产函数的具体形式。Malmquist指数法是在生产前沿面基础上,将相对效率转化为距离函数^[30],并通过DEA和SFA等方法加以测算,已经广泛用于全要素生产率研究。近年来,将DEA与Malmquist指数相结合的方法能够实现全要素生产率的分解,使研究结果更准确,且操作简单,因而得到广泛应用^[31-36]。

索洛余值法对全要素生产率的估计主要来自生产函数。然而,基于生产函数的估计往往无法反映投入品价格的变化,其结果是技术最优而非经济最优。同时,DEA方法与Malmquist指数法是对投入产出比相对效率的衡量,对于效率指标的分解也是基于不同参照技术的假定,忽略了投入产出要素本身特征对生产率的影响。Solminiha等^[37]针对铜矿开采的研究证实,全要素生产率还受到矿物特征、价格以及能源使用成本等因素的影响。同时,以上

方法无法将矿产资源的代际负外部性问题引入模型。而Rodriguez等^[26]在成本函数框架下构建了修正的索洛余值模型,既能兼顾投入要素本身特征的影响,又能更好地控制模型中“相关变量遗漏”问题^[38]。因此,本文基于Rodriguez等^[26]超越对数成本函数的修正索洛余值模型,并借鉴Topp等^[39]、Simon等^[40]、王克强等^[27]的研究,引入双重负外部性成本,构建采矿业的绿色全要素生产率模型。

3 考虑双重负外部性的绿色全要素生产率模型

本文的绿色全要素生产率(*GTFP*)模型构建是在Rodriguez等^[26]、Topp等^[39]、Simon等^[40]以及王克强等^[27]以成本函数为测度的基础模型上,将环境负外部性成本和代际负外部性成本纳入模型,并综合考虑技术进步、规模报酬等因素对*GTFP*增长的影响。在给出了测度模型的基础上,得到超越对数成本函数的具体形式,从而得到后文实证分析中的待估计参数表达式。

3.1 基于成本函数的全要素生产率分析框架

假设采矿业生产函数形式为:

$$Y = Y(X_K, X_L, t) \quad (1)$$

式中: Y 为资源产出量; X_K, X_L 为资本和劳动力要素投入量; t 为时间变量。

假设企业生产遵循成本最小化原则,则生产函数式(1)对应的成本函数可表示为:

$$C = C(w_K, w_L, Y, t) \quad (2)$$

式中: w_K, w_L 分别为资本和劳动力的价格。

由于采矿业为资本密集性行业,资本投入量大且周期较长,短期内,在技术不变条件下,企业资本为不变成本,假设 X_K 是给定的;劳动力 X_L 为可变成本。另外,环境负外部性成本和代际负外部性成本均与矿产资源开采量有关,开采量越多,负外部性成本越高。而且,由于两者的性质截然不同,具有完全可分性。因此,双重负外部性成本可以分别被视为可变成本的组成部分。那么,式(2)可改写为:

$$\begin{aligned} C &= VC(w_L, UC, CE, Y, t) + w_K X_K \\ &= \text{Min}(w_L X_L, UC, CE) + w_K X_K \\ \text{s.t. } Y &= Y(X_K, X_L, t), \text{ and } X_K \text{ given} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: VC 为可变成本; UC 和 CE 分别为代际负外部性成本和环境负外部性成本。

3.1.1 考虑双重负外部性的绿色全要素生产率增长率

根据全要素生产率的定义,其增长可表示为产出增长中未被全部要素投入增长所解释的部分,用 \widehat{TFP} 表示 TFP 的增长率,则有:

$$\widehat{TFP} = \hat{Y} - \hat{F} \quad (4)$$

式中: \hat{Y} 和 \hat{F} 分别为产出和全部要素投入的增长率。因而:

$$\hat{F} = \sum_{i=L,K} \frac{w_i X_i}{C} \times \hat{X}_i = \sum_{i=L,K} S_i \times \hat{X}_i \quad (5)$$

式中:用 S_i 表示要素 i 的成本在总成本中的比重,即 $S_i = \frac{w_i X_i}{C}$ 。

根据成本函数:

$$C = \sum_{i=L,K} w_i X_i \quad (6)$$

可以得到:

$$\begin{aligned} \hat{C} &= \frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=L,K} \frac{w_i X_i}{C} \times \frac{\partial w_i / w_i}{\partial t} + \sum_{i=L,K} \frac{w_i X_i}{C} \times \frac{\partial X_i / X_i}{\partial t} \\ &= \sum_{i=L,K} S_i \times \hat{w}_i + \sum_{i=L,K} S_i \times \hat{X}_i = \sum_{i=L,K} S_i \times \hat{w}_i + \hat{F} \end{aligned} \quad (7)$$

因此:

$$\hat{F} = \hat{C} - \sum_{i=L,K} \frac{w_i X_i}{C} \times \hat{w}_i \quad (8)$$

结合(4)式得到:

$$\widehat{TFP} = \hat{Y} - \hat{C} + \sum_{i=L,K} \frac{w_i X_i}{C} \times \hat{w}_i \quad (9)$$

根据(3)式,总成本的增长率为:

$$\begin{aligned} \hat{C} &= \frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=L,K} \frac{w_i X_i}{C} \times \hat{w}_i + \frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln UC} \times \widehat{UC} + \\ &\quad \frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln CE} \times \widehat{CE} + \frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln Y} \times \hat{Y} + \\ &\quad \frac{X_K}{C} \times \frac{\partial VC}{\partial X_K} \times \widehat{X}_K + \frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial t} + \\ &\quad w_K \times \frac{X_K}{C} \times \widehat{X}_K \end{aligned} \quad (10)$$

令 $w_K^* = -\frac{\partial VC}{\partial X_K}$,简化起见,设 $w_K = w_K^*$

绿色全要素生产率的增长率为:

$$\begin{aligned} \widehat{GTFP} &= \hat{Y} - \hat{C} + \sum_{i=L,K} \frac{w_i X_i}{C} \times \hat{w}_i \\ &= \hat{Y} \left(1 - \frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln Y} \right) - \frac{VC}{C} \times \\ &\quad \frac{\partial \ln VC}{\partial t} - \frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln UC} \times \\ &\quad \widehat{UC} - \frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln CE} \times \widehat{CE} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln Y}$ 表示可变成本的产出弹性; $-\frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial t}$ 为成本函数随时间的变化程度,通常用来代表技术进步; $\frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln UC}$ 表示成本-代际弹性系数, $\frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln CE}$ 表示成本-环境弹性系数,分别为单位代际负外部性成本和单位环境负外部性成本变动百分比导致的成本变动百分比。

考虑到资本投入产出的滞后性问题,在实证中用滞后 τ 期的资本数据来计算对应的成本函数,从而得到相应的 $GTFP$ 增长率。

3.1.2 考虑双重负外部性的绿色全要素生产率实证模型设定

实证模型中,超越对数函数通常更加灵活,更容易体现成本变化的影响,符合本文的研究目的。因此,本文采用超越对数函数作为成本函数形式,因假设资本为准不变成本,所以无 $\ln X_K$ 与 t 的交互项。对应的超越对数形式的成本函数为:

$$\begin{aligned} \ln VC &= \beta_0 + \ln w_L + \beta_Y \ln Y + \beta_K \ln X_K + \\ &\quad \beta_{UC} \ln UC + \beta_{CE} \ln CE + \beta_t t + \\ &\quad \frac{1}{2} (\beta_{YY} (\ln Y)^2 + \beta_{KK} (\ln X_K)^2 + \\ &\quad \beta_{UU} (\ln UC)^2 + \beta_{EE} (\ln CE)^2 + \beta_{tt} t^2) + \\ &\quad \beta_{KU} (\ln X_K \times \ln UC) + \beta_{KE} (\ln X_K \times \ln CE) + \\ &\quad \beta_{UE} (\ln UC \times \ln CE) + \beta_{Yt} (\ln Y \times t) + \\ &\quad \beta_{Ut} (\ln UC \times t) + \beta_{Et} (\ln CE \times t) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: β_0 为常数系数; β_i ($i=L,K,UC,CE,t$)以及 β_{ij} ($i,j=L,K,UC,CE,t$)分别表示劳动、资金、代际负外部性成本、环境负外部性成本和时间变量的影响系数,以及不同变量的交互项系数。根据微观经济理论中可变函数对可变要素的要求,即:

$$\beta_L = 1, \beta_{LL} = 0, \beta_{KL} = 0, \beta_{LY} = 0, \beta_{LK} = 0, \beta_{Lt} = 0$$

并设 $\gamma = \frac{VC}{C}$,因而,绿色全要素生产率表达式为:

$$\begin{aligned} \widehat{GTFP} &= \hat{Y} (1 - \gamma (\beta_Y + \beta_{YY} \ln Y + \beta_{YK} \ln X_K + \\ &\quad \beta_{YU} \ln UC + \beta_{YE} \ln CE + \beta_{Yt} t)) - \\ &\quad \gamma (\beta_t + \beta_{tt} t + \beta_{Yt} \ln Y + \beta_{Ut} \ln UC + \beta_{Et} \ln CE) - \\ &\quad \gamma (\beta_{UC} + \beta_{UU} \ln UC + \beta_{YU} \ln Y + \beta_{KU} \ln X_K + \\ &\quad \beta_{Ut} t + \beta_{UE} \ln CE) \times \widehat{UC} - \gamma (\beta_{CE} + \beta_{EE} \ln CE + \\ &\quad \beta_{YE} \ln Y + \beta_{KE} \ln X_K + \beta_{Et} t + \beta_{UE} \ln UC) \times \widehat{CE} \end{aligned} \quad (13)$$

2019年12月

综上所述,模型参数的含义由表1汇总。

3.2 绿色全要素生产率的影响因素分解模型及估计表达式

根据式(10)和式(11),总成本增长率 \hat{C} 与劳动、资本、代际负外部性和环境负外部性等因素的产出弹性有关。令 $\varepsilon_{CY} = \frac{\partial C/C}{\partial Y/Y}$ 为成本的产出弹性,即单位总成本变化引起产出的变化程度,其倒数可用来衡量规模报酬 RS :

$$RS = \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln C} = \frac{1}{\varepsilon_{CY}} \quad (14)$$

这与式(13)的 \widehat{GTFP} 估算式中的第一部分相对应,即规模报酬。当 $RS < 1$ 时,表明规模成本递减即规模报酬递增; $RS = 1$ 和 $RS > 1$ 则分别表示规模报酬不变和递减。

同时,式(13)的第二部分为成本函数随时间的变化情况,可以用来表征纯技术进步水平的增长率,即基于成本函数的技术进步率 \widehat{TP} 的对偶测度结果:

$$\widehat{TP} = -\frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial t} = -\frac{\partial VC/\partial t}{C} \quad (15)$$

此外,令 U 、 E 分别表示成本-代际弹性系数和成本-环境弹性系数,则分别有:

$$U = \frac{\partial C/C}{\partial UC/UC} = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln UC} = \frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln UC} \quad (16)$$

$$E = \frac{\partial C/C}{\partial CE/CE} = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln CE} = \frac{VC}{C} \times \frac{\partial \ln VC}{\partial \ln CE} \quad (17)$$

因此,结合式(4)-(13)和式(15)-(17),可以对 $GTFP$ 进行分解得到 \widehat{GTFP} 与技术进步、规模报酬、代际负外部性、环境负外部性等因素关系的分解表达式如下:

$$\widehat{GTFP} = \hat{Y} \times \left(1 - \frac{1}{RS}\right) + \widehat{TP} - U \times \widehat{UC} - E \times \widehat{CE} \quad (18)$$

$$\cong I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

式中: $I_1 = \hat{Y} \times \left(1 - \frac{1}{RS}\right)$ 、 $I_2 = \widehat{TP}$ 、 $I_3 = -U \times \widehat{UC}$ 、 $I_4 = -E \times \widehat{CE}$; I_1 中包含规模报酬 RS 和产出因素, RS 与 $GTFP$ 同方向变化,即规模报酬递增有助于 $GTFP$ 增长,且 I_1 与 $GTFP$ 变化同方向。 I_2 揭示了 $GTFP$ 中纯技术进步的影响,与 $GTFP$ 变化方向一致。 I_3 对 $GTFP$ 的影响取决于代际负外部性成本的变动,因为成本-代际弹性系数为正($U > 0$),即随着资源耗减,储量越小,代际负外部性成本越高,从而带动可变成本的提升,因此, I_3 的符号取决于 \widehat{UC} 的符号。同理, I_4 的符号取决于 \widehat{CE} 的符号,环境负外部性成本变化越大,对绿色全要素生产率的影响越大。

结合公式(14)和 $\gamma = \frac{VC}{C}$,可得规模报酬的估计式:

$$\frac{1}{RS} = \gamma(\beta_Y + \beta_{YY} \ln Y + \beta_{YK} \ln X_K + \beta_{YU} \ln UC + \beta_{YE} \ln CE + \beta_{Yt} t) \quad (19)$$

技术进步项的估计式:

$$I_2 = \widehat{TP} = -\gamma(\beta_t + \beta_{tt} t + \beta_{tY} \ln Y + \beta_{tU} \ln UC + \beta_{tE} \ln CE) \quad (20)$$

代际负外部性项的估计式:

$$I_3 = -U \times \widehat{UC} = -\gamma(\beta_{UC} + \beta_{UU} \ln UC + \beta_{UY} \ln Y + \beta_{UK} \ln X_K + \beta_{Ut} t + \beta_{UE} \ln CE) \times \widehat{UC} \quad (21)$$

环境负外部性项的估计式:

$$I_4 = -E \times \widehat{CE} = -\gamma(\beta_{CE} + \beta_{EE} \ln CE + \beta_{EY} \ln Y + \beta_{KE} \ln X_K + \beta_{Et} t + \beta_{UE} \ln UC) \times \widehat{CE} \quad (22)$$

最后,得到绿色全要素生产率的估计式:

表1 模型参数的含义

Table 1 Description of parameters in the model

参数符号	含义	参数符号	含义
Y	资源产出量	UC	代际负外部性成本
X_K	资本投入量	CE	环境负外部性成本
X_L	劳动投入量	\widehat{GTFP}	绿色全要素生产率增长率
t	时间变量	\hat{Y}	产出增长率
w_K	资本价格	\hat{C}	成本增长率
w_L	劳动力价格	\hat{F}	投入要素增长率
γ	可变成本占总成本比重	S_i	要素成本占总成本比重

$$\begin{aligned}
TFP &= I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \\
&= \hat{Y} \times (1 - \gamma(\beta_Y + \beta_{YY} \ln Y + \beta_{YK} \ln X_K + \\
&\quad \beta_{YU} \ln UC + \beta_{YE} \ln CE + \beta_{Yt} t)) - \\
&\quad \gamma(\beta_t + \beta_{tt} t + \beta_{tY} \ln Y + \beta_{tU} \ln UC + \beta_{tE} \ln CE) - (23) \\
&\quad \gamma(\beta_{UC} + \beta_{UU} \ln UC + \beta_{YU} \ln Y + \beta_{KU} \ln X_K + \\
&\quad \beta_{Ut} t + \beta_{UE} \ln CE) \times \widehat{UC} - \gamma(\beta_{CE} + \beta_{EE} \ln CE + \\
&\quad \beta_{YE} \ln Y + \beta_{KE} \ln X_K + \beta_{Et} t + \beta_{UE} \ln UC) \times \widehat{CE}
\end{aligned}$$

4 变量选择与数据处理

双重负外部性成本是本文研究所需的重要变量,因此,本部分首先测算双重负外部性成本,然后对实证分析中涉及的主要变量、数据来源和处理进行说明。

4.1 双重负外部性成本的核算

基于资源耗减理论,代际负外部性的核算方法包括净价值法、净租金法、使用者成本法、净现值法、交易价格法、替代成本法和持续价格法等^[41]。由于使用者成本法不含边际成本参数,也不要求资源租金增长率与利率相等,因而,应用较为广泛。本文选用使用者成本法对采矿业的代际负外部性成本进行核算。该方法的理念是将有限期内开采的可耗竭资源所得收入进行无限期的投资,每年得到永续的真实收入用于补偿资源耗竭带来的负外部性成本。

对于某种给定资源,假设资源的真实收入 X 为当期开采的资源经过代际间投资获得的全部收入, T 为资源的开采年限,资源名义收入 Z 为资源当期的毛收入,用销售收入与销售成本的差额表示。当真实收入的永久贴现值与耗竭资源的名义收入贴现值相等时,则不存在资源分配的代际不公平;当真实收入的贴现值低于耗竭资源的名义收入贴现值时,则会产生代际损失。此时,代际负外部性成

本 UC 可以表示为:

$$UC = Z - X = \frac{Z}{(1+r)^T} \quad (24)$$

式中: r 为贴现率,参考李国平等^[42]选用一年期存款利率;各资源行业剩余可开采年限 T 根据该行业主要矿产品平均可开采年限估算而来。具体地,煤炭和铁矿石的开采年限分别代表煤炭开采业和黑色金属开采业;油气开采年限以石油和天然气的可开采年限平均值计算得到;以铜矿、铅矿和锌矿的开采年限平均值代表有色金属开采业(表2)。

关于环境负外部性成本的核算,包括环境价值损失法、条件价值估值法等^[43]。目前国内外学者多使用条件价值估值法。该方法是在假想的市场条件下,直接调查和询问人们对于环境改善的最大支付意愿,或者对于环境损失的最小受偿意愿,并通过计算得来。由于中国各省市资源种类差异较大,并且各采矿业包含的资源种类数量也不尽相同,很难采用统一的计算方法获得环境负外部性成本。鉴于数据可得性和计算的差异性,本文直接使用郭江等^[44]、吴文洁等^[45]、周吉光等^[46]、贾舒娴等^[47]对采矿企业的环境损失测算结果,即中国煤炭开采业的平均环境损失率约为88.68元/t,石油开采业约为120元/t,天然气开采业约为0.02元/m³,黑色金属开采业约为51.12元/t,有色金属开采业约为2754.70元/t,非金属开采业约为产值的6.2%。考虑到若使用产值相关比例作为环境负外部性成本,可能会与模型中原有的销售产值变量存在完全相关性,所以本文只选用与产量的相关比例进行核算。此外,黑色金属开采业和有色金属开采业仅有2007—2015年和2005—2014年产量数据。各采矿业的代际负外部性成本 CE 可表示为 $CE=REP \times Q$,其中, REP 为平均环境损失率, Q 为产量。表3给出了环境负外部

表2 2005—2015年各类资源的可开采年限

Table 2 Residual recoverable years of each industry, 2005-2015

行业	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
煤炭开采业	180.900	169.980	159.620	146.820	137.040	96.574	67.631	73.106	77.218	83.866	91.622
油气开采业	35.599	33.179	30.600	29.599	29.799	27.941	27.834	28.503	27.961	27.116	29.011
黑色金属开采业	61.729	52.062	44.990	42.307	46.416	32.997	21.919	26.715	27.444	33.044	39.582
有色金属开采业	22.155	20.063	18.381	16.456	16.051	13.240	14.240	10.125	9.826	10.256	10.804
非金属开采业	150.380	138.750	132.300	152.730	157.430	142.440	105.580	100.050	105.470	106.330	104.600

表3 环境负外部性成本描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of environmental negative externalities

行业	平均值	标准差	最小值	最大值
煤炭开采业	253523.4	642263.9	0	4148007
油气开采业	357241.6	749630.1	0	4408512
黑色金属开采业	501811.7	1275967.0	5334.883	7649219
有色金属开采业	614085.7	1568531.0	212.663	1.22e+7
非金属开采业	121315.9	321022.6	1726.093	2419624

性的描述性统计。

4.2 变量选择与数据来源

本文的绿色全要素生产率模型主要涉及以下变量:第一,劳动力成本,用工资总额作为代理指标,通过各地区对应行业的从业人员年末数与平减后的真实工资相乘得到;第二,资本的使用成本,其中,资本价格采用资本的真实利率,即平减的中国人民银行公布的5年以上贷款基准利率;资本投入量为平减的固定资产净值年均余额;第三,产出变量选择平减后的工业销售产值;第四,代际负外部性成本,根据式(24)的使用者成本法进行核算,将各地区对应行业的营业收入减去营业成本作为当期的毛收入。选取各采矿业子行业的主要矿种,将对应矿产资源的基础储量除以开采量作为该矿产资源的开采年限,通过加权平均计算出该行业的开采年限。考虑到资源可以跨省流通交易,所以假设同一年各地区同一开采子行业的开采年限相同,但开采年限的变化,取决于该年的开采数量和基础储量;第五,环境负外部性成本,通过平均环境损失率和该地区对应矿种产量计算得到,其中,平均资源损失率根据相关文献结论确定。在产量方面,除了煤炭开采量直接对应煤炭开采业的产量外,黑色金属开采业产量由铁矿石开采量作为代理变量,有色金属开采业产量由《有色金属工业“十二五”发展规划》中规定的10种重要的有色金属开采量作为代理变量^①。由于石油和天然气对应的平均损失率不同,将开采量分别乘以对应的损失率并求和。由于超越对数函数的形式可能导致估计模型出现多重共线性问题,因此将上述变量进行中心化处理。

本文数据主要来源于2003—2017年的《中国统计年鉴》《中国工业经济年鉴》《中国城市(镇)生活

与价格年鉴》《中国有色金属年鉴》《中国能源年鉴》《中国国土资源统计年鉴》、中国矿权资源网以及《中国劳动统计年鉴》等。由于2005年的《中国工业经济年鉴》缺失,所以,2004年相关数据为2003年和2005年数据平均得到。

采矿业在各省的分布不均衡,因此,对样本的选择需考虑各地产业规模和数据统计情况。考虑数据可得性,本文不包含港、澳、台地区。同时,为保持数据的连续性和可得性,各行业样本范围如下:①煤炭开采和洗选业:剔除天津、上海、浙江、海南、广东和西藏,共有25个省级样本;②石油与天然气开采业:剔除北京、山西、上海、浙江、安徽、福建、江西、湖南、广东、广西、海南、重庆、贵州、云南、西藏和宁夏,共有15个省级样本;③黑色金属开采业:剔除天津、黑龙江、上海、重庆、贵州、西藏、甘肃、青海和宁夏,共有22个省级样本;④有色金属开采业:考虑了剔除北京、天津、上海、江苏、海南、重庆、西藏和宁夏后的23个省级样本;⑤非金属开采业:考虑了剔除北京、天津、山西、上海、海南、西藏、宁夏和新疆后的23个省级样本。由于非金属开采业的各省资源产量数据不可得,本文不作讨论。

5 结果与分析

本部分内容将在模型设定与样本数据基础上,选择合适的面板数据模型进行参数估计。并在估计了考虑双重负外部性的采矿业绿色全要素生产率后,分解绿色全要素生产率,最后采用修正索洛余值模型,估计煤炭、油气、黑色金属和有色金属4个子采矿业的全要素生产率并进行对比,深入分析双重负外部性成本对采矿业绿色全要素生产率的影响。

① 10种有色金属具体指铜、铝、铅、锌、镍、锡、锑、镁、海绵钛和汞。

5.1 面板模型估计方法的选择

常用的面板数据估计方法包括混合最小二乘回归法、固定效应模型法和随机效应模型法等,一般通过F检验、BP检验和Hausman检验等方法进行筛选。此外,这些估计方法通常存在同方差、不存在序列相关性等强假设,但现实中各地区的采矿业可能因地质条件、技术水平等差异导致各省之间存在异方差,而各地区间的贸易往来和技术溢出又容易产生误差自相关问题。因此,需要进一步对残差进行异方差检验和自相关检验。经检验(表4),面板数据存在异方差和误差自相关问题。常见的可同时控制异方差和自相关的方法有可行广义最小二乘法(FGLS)和面板校正法(PCSE)。鉴于PCSE方法在样本数据较少时仍能够得到较为稳健的参数估计结果,因而,本文采用PCSE对模型进行估计。

5.2 模型系数估计、绿色全要素生产率计算与分解

5.2.1 成本函数模型的系数估计

首先,采用上面选择的面板模型估计方法,计算得到4个采矿业子行业关于成本函数模型式(12)的系数(表5)。

从表5可以看出,4个子行业模型参数联合检验都显著不为0,且从 $coldiag^2$ 系数来看,存在共线性问题。但是,由于本文选用的是面板数据,样本量相对充足,并对变量进行了中心化处理,共线性问题仍在可接受范围。

从估计系数来看,各系数符号不完全一致,可以很好地反映采矿业的共性以及各子行业的异质性。单个因素系数结果显示, β_y 、 β_k 的符号皆为正,且通过显著性检验,表明要素投入带动规模扩大会增加可变成本,符合预期。在有色金属开采业和油气开采业,表征时间趋势的 β_t 显著为负,即在控制其他要素的情况下,劳动报酬随时间逐步下降,说明这两个行业在样本期间均有显著的生产效

率增长。而煤炭和黑色金属开采业的 β_l 显著为正,与该行业人均工资在样本区间明显提升有关。在4个行业中,平方项 β_{kk} 和 β_{yy} 基本都显著,且符号一致,说明随着产出的增大、资本投入的扩大以及人力资源的结构性提升导致整体薪酬上升,对可变成成本的边际影响增加,这反映了采矿业规模的快速扩张。煤炭开采业和黑色金属开采业的 β_{tt} 系数显著为负,说明随着时间的推移,工资上涨的影响减弱,生产效率的改进效应逐渐显现。从交互项来看,黑色金属开采业 β_{yk} 显著为负,煤炭、油气资源和黑色金属开采业 β_{yt} 均显著为负,说明资本投入越多、技术水平越高,相应的产出对可变成成本的边际影响越小;而油气开采业的 β_{yk} 交互项显著为正,说明资本对产出的边际成本影响是正向的。

从反映双重负外部性的 UC 和 CE 及其相关项系数来看,显著项系数整体一致,表明采矿业的代际负外部性和环境负外部性具有相同的特性。从单个因素系数来看, β_{UC} 、 β_{CE} 符号皆为正,表明双重负外部性成本的增加会带动可变成成本的增加,符合预期。而其平方项 β_{UU} 和 β_{EE} 显著为正,表明双重负外部性对可变成成本的边际影响有所增加。煤炭开采业的 β_{KU} ,煤炭开采业、油气开采业以及黑色金属开采业的 β_{KE} 均为负,说明资本的投入可能带来机械化水平的提升,开采设备的更新换代降低了负外部性成本对可变成成本的边际影响。但是,有色金属开采业的 β_{KU} 则显著为正,说明该行业的资本扩张会加剧代际负外部性对可变成成本的边际影响。从产出与负外部性的交互项来看,煤炭开采业与黑色金属开采业的 β_{yu} 和 β_{ye} 、油气开采业的 β_{yu} 以及有色金属开采业的 β_{ye} 均为负,说明随着产出的增加,负外部性成本对可变成成本的边际影响越来越小。而油气开采业的 β_{ye} 为正,即随着产出的增

表4 估计模型的检验与选择

Table 4 Estimation model test and selection

检验	检验方法	煤炭	油气	黑色金属	有色金属	说明
混合估计还是固定效应	F检验	$F=30.84$	$F=16.70$	$F=21.95$	$F=11.28$	选择固定效应
混合估计还是随机效应	BP检验	$\chi^2=489.45$	$\chi^2=216.05$	$\chi^2=402.29$	$\chi^2=171.93$	选择随机效应
随机效应还是固定效应	Hausman检验	$\chi^2=60.14$	$\chi^2=33.43$	$\chi^2=15.53$	$\chi^2=31.44$	选择固定效应
是否存在异方差	wald检验	$\chi^2=19703.67$	$\chi^2=1451.69$	$\chi^2=1647.38$	$\chi^2=4815.33$	存在异方差
是否存在自相关	wooldridge	$F=41.81$	$F=8.45$	$F=30.50$	$F=39.41$	存在自相关

2019年12月

表5 采矿业的模型参数估计结果

Table 5 Estimation of model parameters for each mining industry

估计系数	煤炭	油气	黑色金属	有色金属
β_Y	0.1996**	0.3976***	0.8792**	0.3815**
β_K	0.6341***	0.2297***	0.3280***	0.0889*
β_{UC}	0.0477***	0.6656***	0.2708**	0.2594***
β_{CE}	0.1609***	0.0140	0.1408**	0.2741***
β_t	0.0120	-0.0097**	0.0463*	-0.0179***
β_{YY}	0.1832*	0.1666*	0.6836***	0.0848
β_{KK}	0.0873***	0.2448***	0.2220***	0.0988*
β_{UU}	0.0211**	0.1793***	0.2473***	-0.1776
β_{EE}	0.1598***	0.0923***	0.1910***	0.0541***
β_u	-0.0227***	-0.0001	-0.0202***	-0.0002
β_{YK}	-0.0154	0.6902**	-0.1303***	-0.0372
β_{YU}	-0.0057	-0.1920***	-0.5999***	0.1605
β_{YE}	-0.0955**	0.1927***	-0.2827***	-0.1334***
β_{KU}	-0.0247*	0.0712	0.0835	0.1899*
β_{KE}	-0.1434***	-0.2718***	-0.2119***	0.0088
β_{Yt}	-0.0218***	-0.0223*	-0.1033**	-0.0182
β_{Ut}	0.0086	0.0205**	0.0485	-0.0109
β_{Et}	0.0155***	-0.0042	0.0243	0.0202***
β_{UE}	-0.0091	-0.1918***	0.0047	-0.0031
β_0	0.1877***	-0.0361*	-0.0782	-0.1767***
整体 R^2	0.9827	0.8951	0.8661	0.8767
Coldiag ²	61.57	63.23	72.13	93.16

注: *、**、***分别表示在10%、5%、1%的水平上显著。

加,环境负外部性成本对可变成本的边际影响有所上升。时间变量与负外部性的交互项中,仅有油气开采业的 β_{Ut} 、煤炭开采业和有色金属开采业的 β_{Et} 显著,且均为正,说明负外部性成本对可变成本的边际影响日益增大。 β_{UE} 仅在油气开采业显著为负,说明随着代际负外部性的上升,环境负外部性的边际影响会有所下降。

5.2.2 绿色全要素生产率的计算

根据式(10),并结合表5的模型估计系数,下面分别计算采矿业各子行业的全国平均绿色全要素生产率的变动情况,结果参见表6。

整体上,采矿业各子行业在2005—2015年平均绿色全要素生产率增长率均为正,说明生产率水平在不断提升。与陈超凡^[24]、赵萌^[25]等仅考虑环境负外部性的研究结果不同,煤炭开采业、黑色金属开采业和有色金属开采业的 $GTFP$ 不仅没有下降,在样本期间增长率甚至均超过15%。这与本文采用

了成本函数形式有关。煤炭开采业的发展受益于中国经济快速增长所引致的能源需求增长,2002年以来动力煤价格不断攀升,到2011年底煤炭价格达

表6 2005—2015年采矿业各子行业 $GTFP$ 变动情况Table 6 Growth rate of green total factor productivity ($GTFP$) in mining industries, 2005-2015

$GTFP$ /%	煤炭	油气	黑色	有色
2005	30.93	17.20	—	23.37
2006	21.08	12.40	—	32.41
2007	19.70	2.43	33.25	21.85
2008	41.36	2.48	42.57	10.40
2009	16.81	-11.62	11.49	4.88
2010	20.38	14.07	38.17	25.47
2011	22.84	13.52	21.84	20.54
2012	16.16	-6.53	17.38	10.50
2013	10.49	-3.74	18.59	7.34
2014	5.91	0.78	8.68	3.17
2015	-2.86	-23.78	-8.07	—
平均	18.44	1.57	20.43	15.99

到了历史高位,因此,2005—2011年间煤炭开采业的 *GTFP* 增长率平均近25%。2012年以后,受中国经济增速放缓和产能过剩的影响,煤炭需求萎缩、价格下跌,因而 *GTFP* 增长率出现负值,为-2.86%。类似的走势也发生在黑色金属开采业,但其波动幅度更大,主要是受到钢铁产业去产能的影响。这一结果整体上与王克强等^[27]考虑能源耗减因素的研究结论一致。但是,由于本文对代际负外部性的考虑不仅包括能源成本,还包括资源耗竭带来的代际成本,因此,绿色全要素生产率的增长幅度不同。

有色金属开采业整体发展较为平缓,但在2006年、2009年和2012年分别出现拐点。2006年是在下游需求旺盛和宽松货币政策背景下,国内外投资资金不断进入大宗商品交易市场,引起了有色金属价格整体大幅度上涨;2009年受次贷危机的影响,*GTFP* 增速下降,仅为4.88%;而2010年受4万亿救市政策的刺激形成了新一轮波峰,但是,随着宏观经济的放缓,*GTFP* 增速逐年下降。石油与天然气开采业在样本期间虽然整体上也呈现增长趋势,但平均增长率仅为1.57%,远低于其他行业,这与油气的国内储量不足、产量增长乏力有关。在2009年和2015年受石油价格和消费量大幅下降的影响,*GTFP* 增长率降为负值。而在2010年受当年需求拉动的影响,并在2009年基数较低的情况下,出现了大幅度上涨。然而,随

后几年,在供给侧结构性改革的影响下,其 *GTFP* 增长率一直处于较低水平,2015年甚至低至-23.78%。

5.2.3 绿色全要素生产率的分解

根据式(23),并结合模型估计系数表5,可分别计算采矿业各子行业绿色全要素生产率的分解情况,参见表7-10。

(1) 煤炭开采业绿色全要素生产率分解结果

从表7可知,煤炭开采业的技术进步率平均达11.17%,在分解项中贡献最大,这与多年来的“关停并转”、去低端产能、提高机械化水平等政策有关。其次是规模报酬的影响,根据式(24),这与销售产值有关。销售产值的波动主要体现2008—2010年期间,呈现先下降后提升趋势,此后伴随着煤炭产能过剩问题日益凸显,销售产值的增速不断下降,从2013年开始出现负增长。这导致规模报酬也呈现先下降后上升的趋势。负外部性因素对 *GTFP* 的贡献整体为负,其中,代际负外部性的平均贡献为-2.19,高于环境负外部性的影响。总体来看,资源过度开采与粗放式利用严重影响了中国煤炭资源的可持续发展,破坏了生态环境,产生了较高的双重负外部性成本,延缓了产业的绿色技术进步。相对而言,代际负外部性成本的影响高于环境负外部性成本,这与中国煤炭开采业的产业政策和本文负外部性成本计算偏差有关。中国煤炭市场价格波

表7 2005—2015年煤炭开采业 *GTFP* 平均增长及其分解情况

Table 7 Average growth rate and decomposition of green total factor productivity (*GTFP*) in coal mining industry, 2005-2015

年份	<i>GTFP</i> /%	<i>GTFP</i> 分解								
		<i>I</i> ₁			<i>I</i> ₂			<i>I</i> ₃		
		小计/%	<i>RS</i>	\hat{Y} /%	\hat{TP} /%	小计/%	<i>U</i>	\hat{UC} /%	小计/%	<i>E</i>
2005	30.93	29.22	4.48	37.61	5.92	-1.08	0.02	48.43	-3.13	0.17
2006	21.08	18.83	4.25	24.36	7.21	-1.56	0.03	53.97	-3.20	0.18
2007	19.70	16.01	4.11	21.17	8.43	-2.31	0.04	64.54	-2.42	0.18
2008	41.36	35.25	3.56	50.38	9.85	-5.52	0.05	118.38	0.79	0.16
2009	16.81	8.98	3.73	12.26	10.56	-1.02	0.05	21.64	-1.72	0.16
2010	20.38	21.44	3.47	30.14	11.82	-11.32	0.06	175.80	-1.56	0.16
2011	22.84	16.81	3.14	24.64	13.79	-5.80	0.08	76.15	-1.96	0.17
2012	16.16	2.89	3.26	4.16	14.77	-0.91	0.08	11.86	-0.59	0.16
2013	10.49	-5.11	3.85	-6.90	14.37	1.69	0.06	-25.43	-0.46	0.15
2014	5.91	-9.18	4.69	-11.67	13.69	2.00	0.06	-36.13	-0.60	0.13
2015	-2.86	-17.79	6.21	-21.21	12.45	1.70	0.04	-38.41	0.79	0.11
平均	18.44	10.74	4.07	15.00	11.17	-2.19	0.05	42.80	-1.28	0.16

2019年12月

动较大,特别是在煤炭产业资源税从价征收以及关停并转等政策影响下,煤炭资源的代际负外部性成本可能被高估。随着对中国环境问题的日益重视,煤炭开采产生的环境成本越来越高,而本文采用的是周吉光等^[46]的计算结果,尽管在整体趋势上能够解释环境负外部性的影响,但可能存在一定程度上的低估。

(2) 油气开采业绿色全要素生产率分解结果

从表8可以发现,规模报酬对油气开采业的绿色全要素生产率贡献最大,其整体水平较高且逐年上升,尤其是2012年,这与该年国企资源整合,产业集中度提高有关。而且,销售产值也与产品价格走势一致,在“十一五”期间增长迅速,但是其波动幅度不及煤炭开采业,原因在于,一是由于中国油气资源相对匮乏,主要依赖进口而非自产;二是油气开采业的国有化属性更强,并不完全受利润最大化目标驱动。技术进步率的贡献平均为0.22%,这与其技术水平较高和国有垄断有关。代际负外部性对GTFP增长的较大负向影响主要发生在2005—2011年间,自2012年开始为正,但数值较小,这与石油和天然气储量短期内上升有关。2012年,石油可开采年限增加,天然气可开采年限也出现小幅增长。与此同时,油气资源的销售产值增长迅速。然而,代际负外部性和环境负外部性对GTFP的整体贡献仍然为负,且代际负外部性的影响明显高于环境负外

部性。这说明,油气资源,特别是石油资源耗竭的影响加剧了。

(3) 黑色金属开采业绿色全要素生产率分解结果

由表9可知,规模报酬对黑色金属开采业的影响最大,因为其销售产值的变化与煤炭开采业基本一致,但波动幅度更大;规模报酬呈现逐年上升态势,与“十二五”期间铁矿石开采业的产业集中度从40.74%升至66.15%的现状相符合。技术进步率也有较大的提升,因为该行业的专利申请量由2011年的90项增加至2016年的762项,增长了近8.5倍。代际负外部性的影响高于环境负外部性,原因在于,中国铁矿石资源相对丰富,但品位低、贫矿多,开采损耗严重,而且铁矿石产量稳居世界第一,这样的过度开采导致资源耗竭加快。黑色金属开采业也是工业固废和废气的主要来源,具有一定的环境负外部性影响,但由于其成本变动幅度不大,所以对GTFP的影响较弱。

(4) 有色金属开采业绿色全要素生产率分解结果

由表10可以发现,规模报酬对有色金属开采业的影响最大,但其整体变化不大,维持在4%左右的高水平,而销售产值的波动方向与上述分析的宏观经济走势基本相同,但与前3个行业相比,波动幅度更低且都为正增长,原因一是与其本身基数较低有关;二是有色金属开采业包括了多个矿产资源品种,可以进行风险对冲。有色金属开采业的技术进

表8 2005—2015年油气开采业GTFP平均增长及其分解情况

Table 8 Average growth rate and decomposition of green total factor productivity (GTFP) in oil and gas mining industry, 2005-2015

年份	$\widehat{GTFP} / \%$	GTFP分解									
		I_1				I_3			I_4		
		小计/%	RS	$\hat{Y} / \%$	TP/%	小计/%	U	$\widehat{UC} / \%$	小计/%	E	$\widehat{CE} / \%$
2005	17.20	20.97	3.79	26.02	0.21	-2.04	0.08	25.00	-0.13	0.04	3.00
2006	12.4	16.44	3.55	20.70	0.22	-2.52	0.09	27.30	-0.17	0.05	3.56
2007	2.43	2.04	3.93	2.52	0.22	0.19	0.08	-2.31	0.15	0.04	-3.65
2008	2.48	6.45	3.13	8.43	0.23	-3.40	0.11	30.60	-0.08	0.05	1.67
2009	-11.62	-16.62	3.89	-20.65	0.25	3.47	0.07	-48.36	0.01	0.03	-0.31
2010	14.07	21.26	3.42	27.18	0.25	-5.11	0.09	55.35	-0.29	0.04	8.02
2011	13.52	18.32	3.37	23.43	0.25	-3.20	0.10	32.33	-0.02	0.04	0.64
2012	-6.53	-7.99	3.74	-9.97	0.21	0.62	0.09	-6.68	-0.06	0.03	2.14
2013	-3.74	-5.21	3.80	-6.50	0.22	0.85	0.09	-9.84	-0.01	0.03	0.54
2014	0.78	0.87	4.75	1.01	0.19	0.37	0.07	-5.66	-0.59	0.02	28.10
2015	-23.78	-27.92	6.12	-32.00	0.19	2.49	0.04	-59.82	0.30	0.01	-21.27
平均	1.57	2.60	3.94	3.65	0.22	-0.75	0.08	3.45	-0.08	0.03	2.04

表9 2007—2015年黑色金属开采业 *GTFP* 平均增长及其分解情况Table 9 Average growth and decomposition of green total factor productivity (*GTFP*) in the ferrous metal mining industry, 2007-2015

年份	$\widehat{GTFP}/\%$	<i>GTFP</i> 分解									
		I_1			I_2		I_3			I_4	
		小计/%	<i>RS</i>	$\hat{Y}/\%$	<i>TP</i> /%	小计/%	<i>U</i>	$\widehat{UC}/\%$	小计/%	<i>E</i>	$\widehat{CE}/\%$
2007	33.20	33.25	3.70	46.49	7.36	-6.32	0.11	56.43	-1.71	0.09	19.46
2008	42.57	44.46	3.32	63.62	8.63	-9.16	0.12	75.10	-1.35	0.07	20.74
2009	11.49	0.72	3.60	1.00	8.68	2.48	0.08	-29.58	-0.40	0.06	6.95
2010	38.17	41.31	3.89	55.58	9.04	-11.39	0.11	104.05	-0.79	0.04	21.59
2011	21.84	18.71	3.73	25.55	11.06	-7.78	0.15	50.82	-0.16	0.02	6.72
2012	17.38	5.15	4.10	6.82	10.94	1.68	0.13	-13.06	-0.40	0.03	14.52
2013	18.59	8.02	4.58	10.26	11.31	-0.56	0.13	4.23	-0.18	0.02	11.28
2014	8.68	-3.26	5.92	-3.92	9.53	2.44	0.09	-26.08	-0.04	0.01	2.67
2015	-8.07	-20.60	7.58	-23.72	9.15	3.24	0.08	-39.82	0.13	0.02	-7.69
平均	20.43	14.27	4.49	20.19	9.52	-2.82	0.11	20.23	-0.55	0.04	10.69

步率有一定的提升,平均水平为2.12%。代际负外部性和环境负外部性对 *GTFP* 的贡献整体为负,从弹性系数来看,成本-环境弹性系数更大。一方面,中国有色金属矿种类较多,且多为贫矿和伴生矿床,品位较低,增加了开采难度和资源的综合利用,开采中的资源浪费和环境破坏严重,具有较高的代际负外部性和环境负外部性;另一方面,在有色金属开采过程中,企业更多地采用了较为落后的化学提取方法,且耗水、耗电量巨大,这不仅是“三废”排放的主要来源,而且污染物中所含有的化学物质也会进一步破坏生态环境,产生较高的环境负外部性

成本,对 *GTFP* 产生较大影响。

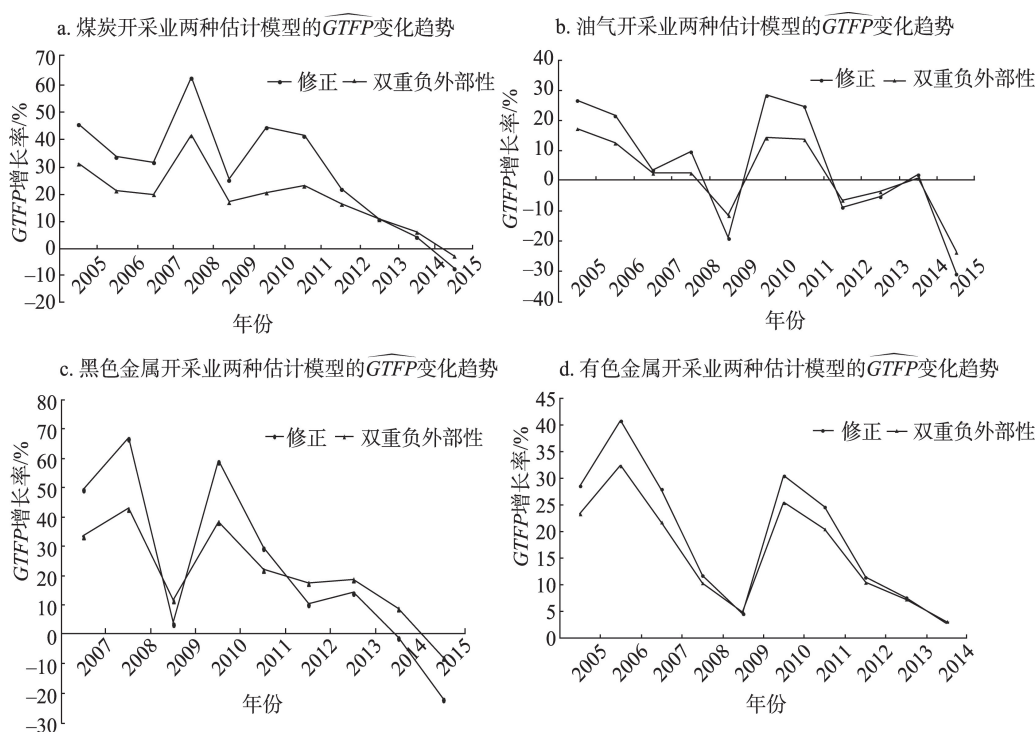
5.3 与修正索洛余值模型结果的对比

为了更深入分析环境负外部性与代际负外部性对估计结果的影响,本文根据修正索洛余值模型,在不考虑双重负外部性情况下,对以上4个行业的全要素生产率进行测算,并与考虑双重负外部性的绿色全要素生产率进行比较分析,比较结果如图1所示。从图1中可以看出,两个模型的整体结果呈现基本一致的发展趋势,差别主要体现在以下两点:一是绿色全要素生产率增速普遍较低,这是因为负外部性成本的内部化提高了可变成本;但在

表10 2005—2014年有色金属开采业 *GTFP* 平均增长及其分解情况Table 10 Average growth rate and decomposition of green total factor productivity (*GTFP*) in nonferrous metal mining industry, 2005-2014

年份	$\widehat{GTFP}/\%$	<i>GTFP</i> 分解									
		I_1			I_2		I_3			I_4	
		小计/%	<i>RS</i>	$\hat{Y}/\%$	<i>TP</i> /%	小计/%	<i>U</i>	$\widehat{UC}/\%$	小计/%	<i>E</i>	$\widehat{CE}/\%$
2005	23.37	23.41	4.28	30.55	1.40	-1.11	0.07	15.47	-0.33	0.16	2.00
2006	32.41	31.76	3.54	44.28	1.92	-0.59	0.03	18.39	-0.68	0.16	4.15
2007	21.85	20.83	3.30	29.89	2.20	-0.17	0.03	6.46	-1.01	0.17	5.83
2008	10.40	8.68	4.02	11.55	1.96	0.01	0.04	-0.25	-0.25	0.15	1.67
2009	4.88	2.95	4.74	3.74	1.81	0.14	0.05	-2.66	-0.02	0.14	0.14
2010	25.47	24.38	4.27	31.84	2.10	-0.37	0.03	12.21	-0.64	0.14	4.45
2011	20.54	18.34	3.52	25.61	2.64	-0.08	0.01	8.47	-0.36	0.16	2.23
2012	10.50	8.04	3.70	11.03	2.67	0.01	0.02	-0.65	-0.22	0.16	1.38
2013	7.34	5.36	4.42	6.93	2.37	0.07	0.03	-2.55	-0.46	0.15	3.05
2014	3.17	1.45	5.25	1.78	2.09	0.14	0.05	-2.99	-0.51	0.15	3.48
平均	15.99	14.52	4.11	19.72	2.12	-0.19	0.04	5.22	-0.45	0.16	2.84

2019年12月

图1 采矿业子行业双重负外部性加入前后 \widehat{GTFP} 变化趋势Figure 1 Trend of \widehat{GTFP} of two estimation models for each mining industry

2014年后出现了反超,其中,黑色金属开采业在2011年就出现了反超,这说明负外部性的影响开始下降;二是绿色全要素生产率的变化趋势更为平缓,根据式(13)可以发现, \hat{Y} 项与 \widehat{UC} 、 \widehat{CE} 项的计算符号相反,在计算绿色全要素生产率增速的过程中,产生了相互抵消效应。

6 结论与政策建议

6.1 结论

本文构建了考虑环境代际负外部性的绿色全要素生产率测度模型,并以2005—2015年省级面板数据为样本,实证研究了中国采矿业的绿色全要素生产率变化情况和关键影响因素。主要结论如下:

第一,基于成本函数模型的估计结果显示,采矿业的三重负外部性特性相同,均对行业可变成本具有显著负向影响,因此,在采矿业绿色全要素生产率计算中有必要考虑三重负外部性成本,否则可能导致GTFP估计结果产生偏误。

第二,考虑三重负外部性的绿色全要素生产率计算结果显示,采矿业各子行业的绿色全要素生产率均有显著增长。黑色金属开采业增速最为明显,

平均达到20.43%;其次为煤炭开采业,平均为18.44%;有色金属开采业平均达到15.99%;而油气开采业最低,仅为1.57%。

第三,对绿色全要素生产率影响因素的分解发现,销售产值增速的影响最大,规模报酬呈现递增趋势。除油气开采业外,其他产业的纯技术进步增速明显。代际负外部性和环境负外部性因素对GTFP皆呈现抑制作用,但由于各子行业的资源特性差异较大,相对而言,煤炭开采业和有色金属开采业受环境负外部性的影响较大,而油气开采业和黑色金属开采业则受代际负外部性的影响更大。

第四,两种模型估计结果的比较分析发现,考虑三重负外部性的绿色全要素生产率增速一般低于不考虑负外部性成本的修正索洛余值模型的结果,并且变化趋势更为平稳,这愈加验证了本文关于三重负外部性对GTFP具有抑制作用的结论。

6.2 政策建议

根据上述研究结论,本文提出以下3条政策建议:

第一,鉴于代际负外部性和环境负外部性对采矿业各子行业绿色全要素生产率的影响存在异质

性,政府应制定以下差异化政策,有针对性地缓解不同采矿业的负外部性问题。

代际负外部性对绿色全要素生产率具有负面影响,全行业的可持续发展将受到严重挑战。为解决这一问题,首先,应提高矿产资源开发利用的技术准入门槛,以技术升级方式有效控制资源浪费与能源过度消耗。例如,鼓励资源高效开采技术和高效利用技术,限制并淘汰落后技术与产能,提高矿产资源的开采效率、回采率和“三废”综合利用率;其次,根据各类资源的储采比制定不同的税费标准与贸易政策。对于受代际负外部性影响程度较高的油气资源和黑色金属矿产,比如石油、铁和铜等,其价格的上涨可能导致成本驱动型通货膨胀,因此,可考虑免征进口税或实施即征即退的优惠政策;对于锰、铬、铝等非战略性矿产品,可考虑实施进口税率减半等优惠政策,以平衡国内外资源供给与需求的矛盾,减缓资源耗竭的压力;而对于储量较为丰富的资源,则要建立产量与耗竭状况的预警机制,防止过度开采与压价出口。总体来说,就是通过鼓励进口、限制出口等方式缩小国内供需缺口,降低代际负外部性对绿色全要素生产率的制约作用,保持采矿业绿色技术进步的增长趋势。

环境负外部性对绿色全要素生产率具有明显的抑制作用。为解决这一问题,首先,政府应明确矿山企业在环境保护、土地复垦、植被恢复等方面的义务与责任,并利用法律手段促进源头污染的治理。其次,应加快修订采矿业能源消耗、污染物排放、环境质量等标准,提高行业的环境准入门槛。再次,针对不同资源开采产生的地质和环境问题的差异性,有针对性地进行环境规制,防止“一刀切”带来的资源投入错位与浪费。政府还应加强资源开发活动的生态环境监管力度,强化环境执法,对资源开采造成的环境违法、违规行为“零容忍”。特别地,煤炭和有色金属开采业是环境污染和生态破坏的主要来源,需进行重点监管,例如,继续削减矿山企业废水、废气和固体废弃物的排放总量额度;以及利用行政、法律、经济与技术等多种手段,提高矿产资源尾矿利用率和选矿回收率等。

第二,采矿业规模报酬递增趋势显著,且对绿色全要素生产率的提升具有正向作用,因此,政府

应进一步整合行业资源,提高产业集中度。近年来,中国在煤炭、稀土等行业进行的以国企为龙头的整合,极大地提高了资源开采的集约化程度,企业利润、生产率等指标都得到一定程度的改善。然而,2017年煤炭、黑色金属、有色金属等行业的大中型企业数量仍有1428、246、333家,存在进一步整合和压缩的空间。此外,应继续优化采矿企业的成本结构,发挥规模经济效应。但需注意的是,在减少无效供给、淘汰落后产能的同时,也需预防在经济下行时期新增落后产能或关停企业“死灰复燃”等问题。

第三,纯技术进步是绿色全要素生产率增长的主要来源之一,因而,政府应继续鼓励采矿业进行绿色技术升级。但在不同的子行业,政策重点应有所不同。在竞争性较强的行业,政府应采用研发补贴、税收优惠等方式鼓励采矿企业持续增加绿色技术研发投入,提升技术创新能力,改善创新绩效;在竞争不足的油气开采业,应积极推进国有企业的混合所有制改革,提高企业投资激励和经营效率;更重要的是破除所有制、市场准入与退出等方面对民营企业的歧视,激发行业竞争活力,强化企业创新动力。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. [National Bureau of Statistic of China. China Statistic Yearbook[M]. Beijing: China Statistic Press, 2017.]
- [2] Li J C, Yu L H. How does state-owned shares affect double externalities and industrial performance: Evidence from China's exhaustible resources industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176: 920-928.
- [3] 中共中央国务院. 中共中央国务院关于加强推进生态文明建设的意见[EB/OL]. (2015-05-05) [2019-05-21]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-05/05/content_2857363.htm. [The State Council of the CPC Central Committee. Opinions of the Central Committee of the CPC and the State Council on Accelerating the Promotion of Ecological Progress[EB/OL]. (2015-05-05) [2019-05-21]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-05/05/content_2857363.htm.]
- [4] 李维明, 高世楫. 经合组织关于绿色全要素生产率核算方法的探索及启示[J]. 发展研究, 2018, (7): 52-57. [Li W M, Gao S J. OECD's research and inspiration on GTFP calculating method[J]. Development Research, 2018, (7): 52-57.]

2019年12月

- [5] 陈阳,唐晓华.制造业集聚对城市绿色全要素生产率的溢出效应研究:基于城市等级视角[J].财贸研究,2018,29(1):1-15. [Chen Y, Tang X H. Spillover effects of manufacturing agglomeration on urban green total factor productivity: Based on the perspective of urban grade[J]. Finance and Trade Research, 2018, 29(1): 1-15.]
- [6] 陈阳,唐晓华.制造业集聚和城市规模对城市绿色全要素生产率的协同效应研究[J].南方经济,2019,38(3):71-89. [Chen Y, Tang X H. Study on the synergistic effect of manufacturing agglomeration and urban size on urban green total factor productivity[J]. South China Journal of Economics, 2019, 38(3): 71-89.]
- [7] 齐绍洲,徐佳.贸易开放对“一带一路”沿线国家绿色全要素生产率的影响[J].中国人口·资源与环境,2018,28(4):134-144. [Qi S Z, Xu J. Influence of trade openness on green TFP of countries along 'the Belt and Road' [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(4): 134-144.]
- [8] Hotelling H. The economics of exhaustible resources[J]. Journal of Political Economy, 1931, 39(2): 137-175.
- [9] Arrow K, Chang S. Optimal pricing, use and exploration of uncertain natural resource stocks[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1982, 9(1): 1-10.
- [10] Solow R M. The economics of resources and the resources of economics[J]. American Economic Review, 1974, 64(2): 1-14.
- [11] Ayres R U, Kneese A V. Production, consumption and externalities [J]. American Economic Review, 1969, 59(3): 282-297.
- [12] 李平.中国工业绿色转型研究[J].中国工业经济,2011,(4):5-14. [Li P. A study on the green transformation of Chinese industry [J]. China Industrial Economics, 2011, (4): 5-14.]
- [13] 吴军.环境约束下中国地区工业全要素生产率增长及收敛分析[J].数量经济技术经济研究,2009,26(11):17-27. [Wu J. TFP growth and convergence across China's industrial economy considering environmental protection[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2009, 26(11): 17-27.]
- [14] 王永卿,王来峰,邓洪星,等.湖北省绿色矿山建设影响因素及其效果分析[J].资源科学,2019,41(8):1513-1525. [Wang Y Q, Wang L F, Deng H X, et al. Influencing factors and performance evaluation of green mining in Hubei Province[J]. Resources Science, 2019, 41(8): 1513-1525.]
- [15] Ramanathan R. An analysis of energy consumption and carbon dioxide emissions in countries of the middle east and north Africa [J]. Energy, 2005, 30(15): 2831-2842.
- [16] 展进涛,徐钰娇,葛继红.考虑碳排放成本的中国农业绿色全要素变化[J].资源科学,2019,41(5):884-896. [Zhan J T, Xu Y J, Ge J H. Change in agricultural green productivity in China considering the cost of carbon emissions[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 884-896.]
- [17] 陈晓,车治铭.中国区域经济增长的绿色化进程研究[J].上海经济研究,2018,(7):43-53. [Chen X, Che Z L. Study on the green process of regional economic growth in China[J]. Shanghai Journal of Economics, 2018, (7): 43-53.]
- [18] 岳鸿飞,徐颖,周静.中国工业绿色全要素生产率及技术创新贡献测评[J].上海经济研究,2018,(4):52-61. [Yue H F, Xu Y, Zhou J. Assessment of China's industrial green total factor productivity and technological innovation contribution[J]. Shanghai Journal of Economics, 2018, (4): 52-61.]
- [19] 潘丹,应瑞瑶.资源环境约束下的中国农业全要素生产率增长研究[J].资源科学,2013,35(7):1329-1338. [Pan D, Ying R Y. Agricultural total factor productivity growth in China under the binding of resource and environment[J]. Resources Science, 2013, 35(7): 1329-1338.]
- [20] 陈诗一.中国工业分行业统计数据估算:1980-2008[J].经济学(季刊),2011,10(3):735-776. [Chen S Y. Reconstruction of sub-industrial statistical data in China: 1980-2008[J]. China Economic Quarterly, 2011, 10(3): 735-776.]
- [21] 向小东,林健.中国工业企业创新全要素生产率评价:基于双前沿面网络DEA-Malmquist指数模型[J].工业技术经济,2017,36(9):93-103. [Xiang X D, Lin J. Evaluation of total factor productivity of innovation in China's industrial enterprises: Based on the double frontiers network DEA-Malmquist index model[J]. Journal of Industrial Technological & Economics, 2017, 36(9): 93-103.]
- [22] 杨茜琳.我国工业分行业全要素生产率估计[J].商业时代,2013,(16):115-117. [Yang Q L. Estimation of total factor productivity in China's industrial sectors[J]. Commercial Times, 2013, (16): 115-117.]
- [23] 张豪,张一弛,张建华.中国行业间全要素生产率的溢出效应与增长源泉:基于10大行业的经验研究[J].华东经济管理,2017,31(4):89-96. [Zhang H, Zhang Y C, Zhang J H. Total factor productivity spillover effects between industries and growth sources in China: Based on the 10 major industries' experience research [J]. East China Economic Management, 2017, 31(4): 89-96.]
- [24] 陈超凡.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,2016,33(3):53-62. [Chen C F. China's industrial green total factor productivity and its determinants: An empirical study based on ML index and dynamic panel data model[J]. Statistic Research, 2016, 33(3): 53-62.]
- [25] 赵萌.中国煤炭企业的全要素生产率增长[J].统计研究,2011,28(8):55-62. [Zhao M. Total factor productivity growth of Chinese coal industry[J]. Statistic Research, 2011, 28(8): 55-62.]
- [26] Rodriguez A, Arias C. The effects of resource depletion on coal mining productivity[J]. Energy Economics, 2008, 30(2): 397-408.
- [27] 王克强,武英涛,刘红梅.中国能源开采业全要素生产率的测度框架与实证研究[J].经济研究,2013,48(6):127-140. [Wang K Q, Wu Y T, Liu H M. An analytical framework and empirical study for TFP in Chinese energy mining industry[J]. Economic Research Journal, 2013, 48(6): 127-140.]

- [28] Malmquist S. Index numbers and indifference surfaces[J]. *Trabajos De Estadística*, 1953, 4(2): 209–242.
- [29] Aigner D, Knox L, Peter S. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models[J]. *Journal of Econometrics*, 1977, 6(1): 21–27.
- [30] Afriat N. Efficiency estimation of production functions[J]. *International Economic Review*, 1972, 13(3): 568–598.
- [31] 张峰, 宋晓娜. 提高环境规制能促进高端制造业“绿色蜕变”吗: 来自绿色全要素生产率的证据解释[J]. *科技进步与对策*, 2019, 36(21): 53–61. [Zhang F, Song X N. Can environmental regulation improve the “green transformation” of high-end manufacturing? Evidence interpretation from green total factor productivity [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2019, 36(21): 53–61.]
- [32] 肖滢, 卢丽文. 资源型城市工业绿色转型发展测度: 基于全国108个资源型城市的面板数据分析[J]. *财经科学*, 2019, (9): 86–98. [Xiao Y, Lu L W. Measurement of industrial green transformation efficiency in resource-based cities: Based on 108 resource-based cities' panel data[J]. *Finance & Economics*, 2019, (9): 86–98.]
- [33] 陈瑶. 中国区域工业绿色发展效率评估[J]. *经济问题*, 2018, (12): 77–83. [Chen Y. Efficiency evaluation of China's regional industrial green development: Based on the perspective of R&D input[J]. *On Economic Problems*, 2018, (12): 77–83.]
- [34] 黄庆华, 胡江峰, 陈习定. 环境规制与绿色全要素生产率: 两难还是双赢?[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(11): 140–149. [Huang Q H, Hu J F, Chen X D. Environmental regulation and green total factor productivity: Dilemma or win-win? [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(11): 140–149.]
- [35] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于SBM-Malmquist生产率指数模型的中国水资源绿色效率变动研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(5): 993–1005. [Sun C Z, Ma Q F, Zhao L S. Green efficiency changes for water resources in China based on SBM-Malmquist model[J]. *Resources Science*, 2018, 40(5): 993–1005.]
- [36] 杨勇, 李忠民. 供给侧结构性改革背景下的要素市场化与工业全要素生产率: 基于31个地区的实证分析[J]. *经济问题探索*, 2017, (2): 31–38. [Yang Y, Li Z M. Factor marketization and industrial total factor productivity under the background of supply-side structural reform: An empirical analysis based on 31 regions [J]. *Inquiry into Economic Issues*, 2017, (2): 31–38.]
- [37] Solminihac D, Gonzales L E, Cerda R. Copper mining productivity: Lessons from Chile[J]. *Journal of Policy Modeling*, 2017, 40(1): 182–193.
- [38] 陈林, 朱沛华. 一种新的考虑全要素生产率的成本函数估计法[J]. *数量经济技术经济研究*, 2017, 34(5): 88–106. [Chen L, Zhu P H. A new method of estimating the cost function by considering total factor productivity[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2017, 34(5): 88–106.]
- [39] Topp V. Productivity in the mining industry: Measurement and interpretation[J]. *Productivity Commission Staff Working Papers*, 2008, 12(2): 176–200.
- [40] Simom Z, Harry B. Australia's mining productivity decline: Implications for MFP measurement[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2014, 41(2): 201–212.
- [41] 林伯强, 何晓萍. 中国油气资源耗减成本及政策选择的宏观经济影响[J]. *经济研究*, 2008, (5): 94–104. [Lin B Q, He X P. Chinese oil and gas depletion costs and macroeconomic impacts of resource tax[J]. *Economic Research Journal*, 2008, (5): 94–104.]
- [42] 李国平, 杨洋. 中国煤炭和石油天然气开发中的使用者成本测算与价值补偿研究[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2009, 9(5): 36–42. [Li G P, Yang Y. User cost of the exploitation of coal and oil & natural gas resource and value compensation in China [J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2009, 9(5): 36–42.]
- [43] 宋益, 黄健柏, 钟美瑞, 等. 外部性成本内部化视角下战略性矿产资源关税替代性政策研究: 以稀土矿为例[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 611–622. [Song Y, Huang J B, Zhong M R, et al. Research on tariffs' alternative policy of strategic mineral resources from the perspective of externality cost internalization taking rare earth mine as an example[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 611–622.]
- [44] 郭江, 铁卫, 李国平. 运用CVM评估煤炭矿区生态环境外部成本的测算尺度选择研究: 基于有效性和可靠性分析视角[J]. *生态经济*, 2018, 34(8): 163–168. [Guo J, Tie W, Li G P. A study on the selection of measurement scale using CVM to evaluate the external cost of ecological environment in coal mining area: Based on validity and reliability analysis[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(8): 163–168.]
- [45] 吴文洁, 常志风. 油气资源开发生态补偿标准模型研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(5): 26–30. [Wu W J, Chang Z F. Research on eco-compensation standard model for oil-gas exploitation[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(5): 26–30.]
- [46] 周吉光, 丁欣. 河北省矿产资源开采造成的环境损耗的经济计量[J]. *资源与产业*, 2012, 14(6): 148–155. [Zhou J G, Ding X. Economic measurement of environmental loss brought by mineral resources exploitation in Hebei Province[J]. *Resource & Industries*, 2012, 14(6): 148–155.]
- [47] 贾舒娴, 黄健柏, 钟美瑞. 生态文明建设背景下江西省有色金属矿产开发生态影响能值分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(9): 1378–1387. [Jia S X, Huang J B, Zhong M R. Energy analysis of the development of nonferrous metals in Jiangxi Province under the background of ecological civilization construction[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(9): 1378–1387.]

Green total factor productivity of Chinese mining industries considering negative intergenerational and environmental externalities

YU Lihong, WANG Yan, CHEN Jiayi

(School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Negative intergenerational and environmental externalities are the basic characteristics of Chinese mining industries. Total factor productivity (*TFP*) had not taken dual negative externalities into account, while most studies on green total factor productivity (*GTFP*) only considered environmental pollution, and therefore it is difficult to measure the true efficiency of green technology in mining industries. In this study, dual negative externalities were added into the modified Solow residual model to measure the growth rate of *GTFP* based on the inter-provincial panel data of mining industries from 2005 to 2015, and then *GTFPs* were decomposed into the effects of technological progress, returns to scale, negative intergenerational externality, negative environmental externality, and so on. The results show that: (1) *GTFP* was generally lower than *TFP* without dual negative externalities, and the overall trend was more stable. (2) The *GTFP* of mining industries presented a clear increasing tendency. Ferrous metal mining industry had the fastest growth rate, followed by coal mining industry and nonferrous metal mining industry, and oil and gas mining industry had the lowest growth rate. (3) The decomposition of *GTFP* shows that negative intergenerational and environmental externalities both restrained *GTFP*. Through a comparative analysis, we found that coal and nonferrous metal industries were greatly affected by negative environmental externality, while extraction of oil and gas and ferrous metal mining were more affected by negative intergenerational externality.

Key words: mining industry; green total factor productivity; negative intergenerational externality; negative environmental externality