

基于 Super-SBM 模型的中国采掘业环境效率及影响因素研究

郑小强 蒲决竹

(西南石油大学经济管理学院,四川 成都 610500)

摘要 利用考虑非期望产出的 Super-SBM 模型测算了中国采掘业的环境效率,并利用固定效应评估法对其影响因素进行回归分析。结果表明:中国采掘业环境效率总体偏低,石油和天然气开采业环境效率最高,非金属矿采选业、煤炭开采和洗选业最低;2001—2017年,中国采掘业在相应技术水平上的资源投入是有效的,但规模效应还不太明显。技术创新、对外贸易对环境效率的提高具有正向作用;在不考虑其他影响因素条件下,产业规模对环境效率的提高具有较强的正向促进作用,但在纳入技术创新、环境治理强度、对外贸易等因素后,产业规模对环境效率的影响并不显著。

关键词 采掘业 环境效率 数据包络分析

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.03.022

Environmental efficiency analysis and influencing factors of China's extractive industry based on Super-SBM model ZHENG Xiaoqiang, PU Yangzhu. (School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500)

Abstract: The Super-SBM model that considered undesired output was used to measure the environmental efficiency of China's extractive industry, and the fixed effect evaluation method was used to perform regression analysis on its influencing factors. The results showed that the environmental efficiency of China's extractive industry was low. In addition, extraction of petroleum and natural gas had the highest environmental efficiency, nonmetal minerals and coal mining had the lowest environmental efficiency. During the period from 2001 to 2017, China's extractive industry's pure technological efficiency was effective, but the scale efficiency was ineffective. Technological innovation and foreign trade had positive effects on the improvement of environmental efficiency. Without regard to other influencing factors, industrial scale had a strong positive role in the improvement of environmental efficiency, but after incorporating factors such as technological innovation, environmental regulation intensity and foreign trade, industrial scale had no significant impact on environmental efficiency.

Keywords: extractive industry; environmental efficiency; data envelopment analysis

采掘业作为国民经济的基础性产业,为我国的能源、工业、农业等提供了丰富的矿物原料,对国民经济发展起到了重要的支撑作用。但由于历史原因,矿产等资源开采带来的环境污染也在与日俱增,资源开采中的污染问题愈发受到关注。对我国采掘业环境效率进行测度,分析影响我国采掘业环境效率的因素,具有一定的现实意义。

环境效率指单位环境负荷下某一地区或企业产生的经济价值,是将环境作为一种资源投入,力求环境资源的最小使用和最大产出,是衡量实现可持续发展的标准之一^{[1]365}。随着公众对环境问题的关注,环境效率测评的方法也越来越丰富,环境压力控制模型(IPAT)、生命周期法(LCA)、生态足迹法(EF)、生产前沿分析法(PFA)是最为常见的环境效

率测度方法。IPAT能有效测量人类活动对环境的输入性影响或压力^[2];LCA通常用于评估与废物转化能源计划有关的环境负担^[3];EF通常用于衡量某一地区的可持续发展^[4]。但是,以上环境测量模型在分析人文因素对环境的影响中均具有一定的局限性^[5]。在环境静态效率测度方法的选择上,非参数的数据包络分析(DEA)方法具有更多的优势。FARE等^[6]首次提出基于DEA的环境效率评价方法,即非参数DEA,可有效处理多投入、多产出的问题,也可以处理投入(或产出)项目中其他方法难以处理的指标。国内现有的运用DEA方法研究环境效率的相关报道,集中在环境效率的省际或区域比较上,如王俊能等^{[1]369}利用DEA对中国31个省份进行环境效率分析与评价;杨帅^[7]探讨了在省域相

第一作者:郑小强,男,1981年生,博士,副教授,研究方向为可持续发展。

对能源效率指标计算的 DEA 方法中,不同的数据处理方法和不同产出指标的选择可能会带来的结果差异。也有部分研究关注行业环境效率问题,如林伯强等^{[8][132]}运用非径向方向距离函数测算中国工业两位数行业的环境效率,发现中国工业行业环境效率水平不高,但整体处于上升趋势;冯博等^[9]对建筑业的环境效率进行测算分析,并检验了各种外部环境因素对其环境效率的影响;BI 等^[10]、CHEN 等^[11]、WU 等^[12]也对中国的其他行业进行了环境效率测度。在各行业环境效率研究中,对采掘业环境效率的研究还有所欠缺,特别是运用非参数 DEA 方法对该行业环境效率的测度与分析。

在具体的测量模型选择上,传统径向 DEA 会忽略报告效率得分方面的松弛变量,而这些松弛变量在评估管理效率中起着重要作用。SBM 模型是一种较完善的 DEA 扩展模型,它可以很好地处理模型中的松弛问题,而且可以将环境因素很好地纳入 SBM 模型的测度中,避免了径向和角度差异带来的影响。汪克亮等^[13]、CHEN 等^[14]、HUANG 等^[15]的研究均采用 SBM 模型,在测量中国能源经济效率、环境效率和全要素效率方面均显示出较高的有效性。考虑非期望产出的 Super-SBM 模型结合了 Super-DEA 与 Undesirable-SBM 模型两者的优点,不仅可以有效处理非期望产出,还可以进一步比较有效的决策单位的高低。所以,本研究运用考虑非期望产出的 Super-SBM 模型对中国采掘业的能源环境效率进行测度,主要考虑伴随着期望产出产生的非期望产出对环境的影响,并运用固定效应评估法对采掘业环境效率的影响因素进行分析。

1 模型与数据来源

1.1 采掘业环境效率测量模型

CHARNES 等^[16]提出了 DEA,CCR 是 DEA 模型 7 类中最基本、最重要的技术,在 CCR 模型中,决策单元的 DEA 有效性是同时针对规模有效性和纯技术有效性而言的,然而在实际中可能会出现这样的情况:一个决策单元虽然是纯技术有效的,但它不一定也是 DEA 有效的,原因在于该决策单元非规模有效。由此 BANKER 等^[17]在此基础上扩展了 CCR 模型中关于规模报酬不变的假设,提出可变规模(VRS)模式的 DEA 模型,即 BCC 模型。这种传统的 DEA 模型一般采用谢泼德距离函数(SDF)作为产出距离函数,这种函数假定期望产出与非期望产出同比例增加或缩减。但是,在现实生活中,并非

所有的产出都按比例进行操作。这种径向模型的缺点是忽略了报告效率得分方面的松弛变量,而这些松弛变量在评估管理效率中起着重要作用。TONE^[18]首次提出了非径向非角度的基于松弛变量测度的 SBM 模型,SBM 模型既能够避免传统 DEA 模型径向与角度带来的偏差,又考虑了松弛变量的影响,还能将环境因素很好地纳入 SBM 模型的测度中。为了能更好地解决生产过程中产生的污染问题,在基础 SBM 模型的基础上衍生出了考虑非期望产出的 SBM 模型,即 Undesirable-SBM 模型。在采用 Undesirable-SBM 模型进行评价时,通常会出现多个决策单元效率值均为 1 的情况,无法进一步对有效决策单元效率高低进行区分。ANDERSEN 等^[19]提出了超效率 DEA 模型,即 Super-DEA,这个模型可以解决 Undesirable-SBM 中无法区分有效决策单元高低的问题。为了综合 Undesirable-SBM 模型和 Super-DEA 模型两者的优点,本研究参考宫大鹏等^[20]的研究,利用考虑非期望产出的 Super-SBM 模型计算采掘业的环境效率。

1.2 变量选取及数据来源

以资本和劳动力作为投入变量,工业总产值作为期望产出,以有害气体及废水排放量作为非期望产出,各变量具体界定如下:

(1) 固定资本投入。采掘业是一个资金投入高度集中的行业,其中,勘探、开发过程中,基建、设备等固定资产投资是重要投入要素。本研究将每年开采业的固定资产投资累计完成额度作为资产投入。

(2) 劳动力投入。劳动时间和劳动报酬方面的数据可以很好地衡量劳动投入,但由于其数据无法准确获得,因此,选取采掘业从业人员数作为该行业的劳动力投入。

(3) 能源投入。能源投入将选取开采中的煤炭、原油、柴油、汽油、天然气和电力消耗总量,按照折合系数换算为总标准煤能源消耗。

(4) 期望产出。工业总产值是以货币形式表现的工业企业在一定时期内生产的已出售或可供出售工业产品总量,可反映一定时间内工业生产的总规模和总水平。由此,选择采掘业的工业总产值作为期望产出。

(5) 非期望产出。资源开采过程中会对所在地区的大气环境、水环境和土壤造成一定影响。大气污染主要是废气排放,水污染主要是废水排放。对土壤的破坏主要表现在:一是占用土地,破坏植被;二是开发过程中的废水直接或间接进入土壤,导致

植被破坏、土质恶化及沙漠化;三是原油泄漏或矿区开采遗留废渣,造成土壤污染。近年来,我国实施了更加严格的矿产资源开发利用和生态环境保护政策,坚持矿产资源开发利用与生态环境保护并重的原则,严格执行土地复垦和排污收费,矿产资源开采过程中破坏植被的现象得到了有效遏制。所以,本研究未将土壤破坏纳入非期望产出,而是将大气污染(SO_2 排放量)和水污染(废水排放量)作为非期望产出。

数据来源于统计年鉴,主要包括各年的中国环境统计年鉴、中国统计年鉴、中国能源环境年鉴、中国工业统计年鉴和中国经济普查年鉴。由于2001、2017年废水排放量指标缺失,按1%的增速估算了2001、2017年的废水排放量。同时,由于决策单元数量较少,在构建投入指标时,固定资本投入、劳动力投入、能源投入被赋予同等重要的权重,即各占1/3;同样,非期望产出 SO_2 、废水排放量各被赋予权重1/2。考虑到数据的可得性与连续性,本研究不包括中国香港、中国澳门、中国台湾和西藏。

2 实证分析

2.1 中国采掘业环境效率变化趋势

依据 Super-SBM 模型利用 MaxDEA Pro6.6 软件计算出 2001—2017 年中国采掘业各行业环境效率(见表1)。

2001—2017年,采掘业各行业环境效率的方差

较小,说明在此期间各行业环境效率波动幅度不大。其中,石油和天然气开采业环境效率最高,其次为有色金属矿采选业,煤炭开采和洗选业最低,均值分别为1.432、0.896、0.460;石油和天然气开采业除2017年外均达到 DEA 有效,黑色金属矿采选业与有色金属矿采选业约50%的年份达到 DEA 有效,而非金属矿采选业仅两年达到 DEA 有效,煤炭开采和洗选业各年均未达到 DEA 有效。

采掘业各行业环境效率差异可以从生产、储运等行业属性寻求合理解释。2001—2017年石油与天然气开采总体表现良好,由于石油与天然气开采对环境的影响主要体现在油气田开发阶段,油气储运主要通过管道完成,对环境造成的直接污染较小,其环境效率也相对较高。有色金属在高端制造业中占有重要地位,与其他黑色金属相比,其附加值更高,期望产出更大,所以该行业在采掘业中的环境效率更高。非金属矿采选业、煤炭开采和洗选业环境效率都偏低,主要原因是我国非金属矿山的数量多而规模小,初级产品比重大,深加工程度不高^[21],非金属矿山的大量共生资源没有得到合理利用,“三废”未得到综合治理,产生大量固体废弃物,导致环境效率偏低。

环境效率可分解为纯技术效率与规模效率^[22]。纯技术效率普遍大于1,表明在相应的技术水平上其投入的资源使用是有效的;规模效率普遍小于1,表明规模效应还不太明显。2001—2017年,我国采

表1 采掘业各行业的环境效率

Table 1 Environmental efficiency of extractive industries

项目	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
2001年	0.415	1.746	0.440	1.130	0.494
2002年	0.468	1.684	0.484	1.216	0.708
2003年	0.416	1.705	0.578	1.130	0.602
2004年	0.338	1.707	0.639	1.153	0.440
2005年	0.408	1.640	0.460	1.041	0.436
2006年	0.423	1.676	0.447	1.058	0.453
2007年	0.494	1.681	0.605	1.095	0.545
2008年	0.638	1.583	1.094	0.731	0.661
2009年	0.623	1.424	1.154	0.063	0.852
2010年	0.544	1.269	1.069	0.495	1.019
2011年	0.573	1.435	1.128	0.618	0.642
2012年	0.441	1.380	1.115	0.627	0.700
2013年	0.718	1.416	1.073	0.816	1.027
2014年	0.385	1.373	1.245	0.558	0.864
2015年	0.062	1.095	0.096	1.773	0.074
2016年	0.448	1.177	1.190	0.705	0.882
2017年	0.418	0.359	1.218	1.022	0.589
方差	0.020	0.109	0.125	0.146	0.055
均值	0.460	1.432	0.826	0.896	0.646

掘业环境效率介于 0.62~1.01(见图 1),环境效率并不高,还有进一步提升的空间;纯技术效率介于 1.01~1.64,纯技术效率 DEA 有效;规模效率介于 0.57~0.91,规模效率 DEA 无效,表明我国采掘业规模效率偏低。

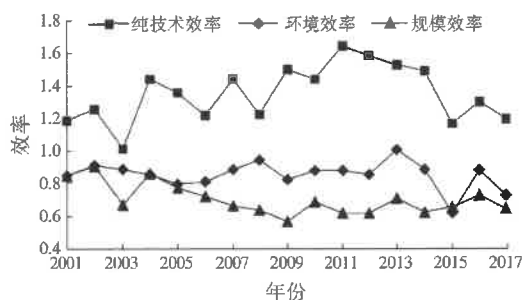


图 1 采掘业环境效率、纯技术效率和规模效率
Fig.1 Environmental efficiency, pure technical efficiency and scale efficiency of extractive industries

2001 年以后,随着我国经济的快速发展,工业及民用能源消费快速增长,能源产品从 20 世纪末的全面供过于求转向供应偏紧,煤炭、石油等重要资源开始出现短缺,采掘业“保供”压力逐渐增大。由此,大量“小煤窑”“高含硫井”等低效能的采掘企业死灰复燃开始生产,资源开采过程中的环境问题被忽视。随后,“十一五”规划提出建设“资源节约型、环境友好型社会”,相关环境政策陆续出台,环保投资力度加大。原国家安全生产监督管理总局明确提出在 2008 年彻底关停“小煤窑”,采掘业的落后产能逐步被淘汰,资源利用率不断提高,这也是 2009 年后规模效率缓慢提升的原因。

2.2 采掘业环境效率影响因素分析

利用 Super-SBM 模型测算得到我国采掘业的能源环境效率,虽然可以依据纯技术效率、规模报酬等情况推测出产业规模等因素可能对采掘业环境效率的影响,但是无法确定其他影响因素对环境效率的影响程度。以下将通过回归模型分析我国采掘业环境效率的影响因素。

随着产业规模扩大,规模效应带来的经济增长一方面为环境治理投资提供资金保障,另一方面也有助于提高行业环境效率。环境规制有利于工业产业绩效的提高,也会促进行业生产技术的进步^{[23]110},这为环境规制对环境绩效产生正向影响提供了可能。林伯强等^{[8]138}的研究表明,对外贸易同时通过进、出口两种途径对能源环境效率产生影响,在我国能源和矿产资源对外依存度较高的背景下,对外贸易是影响采掘业环境效率的重要因素。李静^[24]、胡达沙等^[25]的相关研究表明经

济规模、产业结构、对外开放程度、政府规制和地区因素对我国环境效率均有不同程度的显著影响。由此,本研究选取产业规模、技术创新、环境治理强度、对外贸易 4 个变量作为其他影响变量,建立回归模型,如式(1)所示:

$$E_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \ln S_{i,t} + \beta_2 \ln T_{i,t} + \beta_3 R_{i,t} + \beta_4 O_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (1)$$

式中: $E_{i,t}$ 为第 i 个行业第 t 年的环境效率; $S_{i,t}$ 为第 i 个行业第 t 年的产业规模; $T_{i,t}$ 为第 i 个行业第 t 年的技术创新程度; $R_{i,t}$ 为第 i 个行业第 t 年的环境治理强度; $O_{i,t}$ 为第 i 个行业第 t 年的对外贸易程度; i 取 1、2、3、4、5 分别代表煤炭开采和洗选业、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; t 为年份; β_1 至 β_4 为回归系数; $\epsilon_{i,t}$ 为随机误差项。

分别对产业规模以及另外 3 个解释变量对环境效率的影响进行检验,由于样本数据为平衡静态面板,对被解释变量(环境效率)和解释变量(产业规模)进行个体效应、时间效应检测以及 Hausman 检验,原假设使用混合最小二乘法(OLS)模型。在随机效应模型(1)中, $p < 0.01$,均通过了 0.01 的假设检验,拒绝原假设,也就是说固定效应模型和随机效应模型显著性优于混合 OLS 模型;但未通过 Hausman 检验($p > 0.1$),表明随机效应模型基本可以满足要求。通过随机效应模型(1)得出以下结论,产业规模在 0.05 的显著性水平下通过了检验,表明产业规模对环境效率的提高具有较强的正向促进作用。因为一定的产业规模能为行业发展提供充足的资金和技术保障,进而产生对环境的溢出效应,使得在资源开采过程中减少对环境的破坏,提升环境效率。在随机效应模型(2)中,个体效应检测与时间效应检测结果均通过了 0.01 的显著性检验, Hausman 检验结果 $p > 0.1$,所以采用随机效应模型是可行的。通过随机效应模型(2)得出以下结论,技术创新通过了 0.05 的显著性检验,环境治理强度与对外贸易皆通过了 0.01 的显著性检验。技术创新系数为正(0.069),表明技术创新对环境效率的提高有显著的正向作用,技术创新提高 1% 促进环境效率提高 0.069%,技术的创新,设备的更新,资源利用率的提高,在很大程度上直接减少了污染物的排放以及资源浪费。环境治理强度系数为 -7.999,环境规制对环境效率具有负向影响,该结论进一步验证了刘金林等^{[28]112}关于环境规制与技术进步“U”型关系的结论,即随着环境治理强度的增强,采掘业的生产技术

表 2 行业环境效率的回归结果¹⁾
Table 2 Regression results of industry environmental efficiency

项目	随机效应模型(1)		随机效应模型(2)		固定效应模型	
	系数	<i>p</i>	系数	<i>p</i>	系数	<i>p</i>
产业规模	0.051 * * (0.022)	0.024			0.033 (0.044)	0.452
技术创新			0.069 * * (0.027)	0.012	0.058 * (3.609)	0.084
环境治理强度			-7.990 * * * (2.562)	0.002	-6.267 * (3.609)	0.089
对外贸易			0.002 * * * (0.001)	0.007	0.003 * * * (0.001)	0.007
截距项	0.459 * (0.254)	0.071	0.499 * * (0.249)	0.045	0.229 (0.348)	0.514
个体效应检测		<0.001 * * *		<0.001 * * *		<0.001 * * *
时间效应检测		<0.001 * * *		<0.001 * * *		1.000
Hausman 检验		0.951		0.965		0.082 *

注: ¹⁾ 括号内为标准误差, * * * 表示 $p < 0.01$, * * 表示 $p < 0.05$, * 表示 $p < 0.1$ 。

进步呈现“U”型变化,从长期来看,若不断提高环境治理强度至“拐点”水平,将促使企业进行技术创新,进而带来环境效率的提升。对外贸易对采掘业环境效率的影响系数为正,但系数较小,对外贸易带来的技术和管理溢出效应在我国采掘业的整体表现还不够明显。

最后,对所有解释变量进行检测,结果见表 2 中的固定效应模型。当模型加入了个体效应时, $p < 0.01$,拒绝原假设,但并未通过时间效应检测,随后又进行了 Hausman 检验,结果显示 $p < 0.1$,使用随机效应模型并不能满足要求,由此,采用固定效应模型对样本数据进行回归分析。当加入了所有变量之后,只有产业规模变量未通过显著性检验,意味着在提高技术水平,把控好环境治理强度以及外资带来的技术溢出和管理溢出效果的同时,产业规模对环境效率的影响在降低。

3 结论与建议

运用 Super-SBM 模型对 2001—2017 年我国采掘业中 5 个代表行业进行环境效率测度,并通过回归分析探讨了采掘业环境效率影响因素,主要结论如下:

(1) 我国采掘业环境效率不高,内部 5 个代表行业环境效率差距明显。石油和天然气开采业环境效率最高,其次为有色金属矿采选业,非金属矿采选业、煤炭开采和洗选业最低。

(2) 我国采掘业纯技术效率 DEA 有效,在相应技术水平上的资源投入是有效的,但规模效率 DEA 无效,规模效率偏低,规模效应还不明显。

(3) 技术创新对环境效率的提高有显著的正向作用。技术创新在一定程度上直接减少了污染物的排放以及资源浪费。对外贸易对采掘业环境效率的正向影响还不够明显。采掘业环境规制与环境效率可能存在“U”型关系。

(4) 在不考虑其他影响因素的情况下,产业规模对环境效率具有较强的正向促进作用。但在纳入技术创新、环境治理强度、对外贸易等因素后,产业规模对环境效率的正向影响并不显著,表明在提高技术水平,把控好环境治理强度以及外资带来的技术溢出和管理溢出效果的同时,扩大产业规模对环境效率的影响在降低。

根据上述结论,提出如下建议:

(1) 进一步扩大采掘业规模,提高市场集中度。采掘业属于资本密集型行业,避免盲目扩张,保持适度的行业规模有助于获得更多资金进行技术升级和环境治理,关停生产效率低且环境污染大的矿、油、气井,适度提高市场集中有助于采掘业环境效率的提升。

(2) 建立合理的技术创新驱动机制,加快采掘业技术创新步伐。政府应鼓励研发与能源使用和环保有关的先进设备,提高能源使用率。通过制定科学技术发展方针,对采掘业科技研发实行有利的宏观调控,制定合理的补贴政策,完善专利保护政策,并且建立相应的监督政策和监督机构,确保政策体系得到有效的贯彻。

(3) 严格环境规制,加大采掘业环保治理投入。现有的环境治理强度并不利于环境效率的提高,需进一步提升采掘业环境规制力度。根据采掘业各行

业特点分别制定环保规制政策和标准,依据“谁污染谁治理”的原则,落实“环保终身责任制”,改变以命令控制措施为主的环境保护政策,化被动为主动,激励采掘企业主动投入环保治理。

(4) 加强国际多边合作,扩大对外开放程度。通过先进的技术和管理方式的溢出或规模效应,从技术和管理方式上减少采掘业污染物排放,改变产业产值严重依赖能源消耗和资源投入的情况,同时鼓励企业采用先进设备,借鉴发达国家清洁生产技术,对能源进行二次利用。

参考文献:

- [1] 王俊能,许振成,胡习邦,等.基于 DEA 理论的中国区域环境效率分析[J].中国环境科学,2010,30(4).
- [2] 钟兴菊,龙少波.环境影响的 IPAT 模型再认识[J].中国人口·资源与环境,2016,26(3):61-68.
- [3] ZHOU Z Z, TANG Y J, CHI Y, et al. Waste-to-energy: a review of life cycle assessment and its extension methods[J]. Waste Management & Research, 2018, 36(1): 3-16.
- [4] 金书秦,王军霞,宋国君.生态足迹法研究述评[J].环境与可持续发展,2009,34(4):26-29.
- [5] 王永刚,王旭,孙长虹,等. IPAT 及其扩展模型的应用研究进展[J].应用生态学报,2015,26(3):949-957.
- [6] FARE R, GROSSKOPF S, LOVELL C K, et al. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach[J]. Review of Economics and Statistics, 1989, 71(1): 90-98.
- [7] 杨帅.基于环境因素的能源效率 DEA 方法探讨[J].当代经济管理,2012,34(8):7-13.
- [8] 林伯强,刘泓汛.对外贸易是否有利于提高能源环境效率——以中国工业行业为例[J].经济研究,2015,50(9).
- [9] 冯博,王雪青.中国各省建筑业碳排放脱钩及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2015,25(4):28-34.
- [10] BI G B, SONG W, ZHOU P, et al. Does environmental regulation affect energy efficiency in China's thermal power generation? Empirical evidence from a slacks-based DEA model[J]. Energy Policy, 2014, 66: 537-546.
- [11] CHEN Y, LIU B S. The energy efficiency of China's regional construction industry based on the three-stage DEA model and DEA-DA model[J]. Construction Management, 2016, 20(1): 34-47.
- [12] WU J, ZHU Q Y, CHU J F, et al. Measuring energy and environmental efficiency of transportation systems in China based on a parallel DEA approach[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 48: 460-472.
- [13] 汪克亮,杨力,杨宝臣,等.能源经济效率、能源环境绩效与区域经济增长[J].管理科学,2013,26(3):86-99.
- [14] CHEN L, JIA G Z. Environmental efficiency analysis of China's regional industry: a data envelopment analysis (DEA) based approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142(2): 846-853.
- [15] HUANG H F, WANG T. The total-factor energy efficiency of regions in China: based on three-stage SBM model[J]. Sustainability, 2017, 9: 1664-1683.
- [16] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision-making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [17] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078-1092.
- [18] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [19] ANDERSEN P, PETERSEN N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1993, 39(10): 1261-1264.
- [20] 官大鵬,赵涛,慈兆程,等.基于超效率 SBM 的中国省际工业化能源效率评价及影响因素分析[J].环境科学学报,2015,35(2):585-595.
- [21] 叶张煌,张琪,闫强,等.中国非金属矿业可持续发展战略探讨[J].中国矿业,2014,23(6):4-9.
- [22] 成刚.数据包络分析方法与 MaxDEA 软件[M].北京:知识产权出版社,2014.
- [23] 刘金林,冉茂盛.环境规制对行业生产技术进步的影响研究[J].科研管理,2015,36(2).
- [24] 李静.中国区域环境效率的差异与影响因素研究[J].南方经济,2009(12):24-35.
- [25] 胡达沙,李杨.环境效率评价及其影响因素的区域差异[J].财经科学,2012(4):116-124.

编辑:胡翠娟 (收稿日期:2020-06-11)

(上接第 363 页)

- [14] CARR S A, LIU J, TESORO A G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2016, 91: 174-182.
- [15] TALVITIE J, MIKOLA A, SETÄLÄ O, et al. How well is microlitter purified from wastewater? - A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant[J]. Water Research, 2017, 109: 164-172.
- [16] ZUBRIS K A, RICHARDS B K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge[J]. Environmental Pollution, 2005, 138(2): 201-211.
- [17] SILLANPÄÄ M, SAINIO P. Release of polyester and cotton fibers from textiles in machine washings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(23): 19313-19321.
- [18] 罗河胜.塑料材料手册[M].广州:广东科技出版社,2004.
- [19] MCCORMICK A, HOELLEIN T J, MASON S A, et al. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(20): 11863-11871.
- [20] BOTTERELL Z L R, BEAUMONT N, DORRINGTON T, et al. Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: a review[J]. Environmental Pollution, 2019, 245: 98-110.
- [21] GEISER M, SCHURCH S, GEHR P. Influence of surface chemistry and topography of particles on their immersion into the lung's surface-lining layer[J]. Journal of Applied Physiology, 2003, 94(5): 1793-1801.
- [22] LITHNER D, LARSSON A, DAVE G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(18): 3309-3324.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2020-04-30)