

DOI: 10.5846/stxb201407081398

费威, 刘心, 杨晨. 基于 MFA 和 DEA 的区域经济环境效率评价——以辽宁省为例. 生态学报, 2015, 35(11): 3797-3807.

Fei W, Liu X, Yang C. Economic and environmental efficiencies based on material flow analysis and data envelopment analysis: a case study of Liaoning Province. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3797-3807.

基于 MFA 和 DEA 的区域经济环境效率评价 ——以辽宁省为例

费 威^{1,2,*}, 刘 心¹, 杨 晨¹

1 东北财经大学数学与数量经济学院, 大连 116025

2 大连理工大学管理科学与工程博士后流动站, 大连 116024

摘要: 对经济与环境效率的科学评价是实现区域可持续发展的前提。运用物质流分析将辽宁省经济系统中数据进行物质化处理, 再利用改进的数据包络分析模型对环境和经济效率进行综合评价。结果表明: 辽宁省物资消费不主要依赖于进口, 向其它地区物质输出量大; 环境效率评价的综合效率主要受规模因素影响而显著低于纯技术效率, 而整体经济的综合效率却主要受纯技术效率影响而下降。第二产业比重依然偏大的产业结构特征是导致上述结果的主因。进一步改造提升传统产业, 发展战略性新兴产业, 提高第三产业发展水平, 扩大环保规模, 促进居民生活质量水平全面提升, 将是辽宁省以及与之相似的资源依赖型区域可持续发展的方向。

关键词: 物质流; 数据包络分析; 经济环境效率; 辽宁省

Economic and environmental efficiencies based on material flow analysis and data envelopment analysis: a case study of Liaoning Province

FEI Wei^{1,2,*}, LIU Xin¹, YANG Chen¹

1 Mathematics and Quantitative Economics School, Dongbei University of Finance & Economics, Dalian 116025, China

2 Management Science and Engineering Center for Post-doctoral, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: We assessed regional sustainable development by analyzing economic and environmental efficiencies. We applied material flow analysis (MFA) and data envelopment analysis (DEA) models to measure the material input and output for Liaoning, a province in northeast China. Liaoning is an old industrial area and has suffered from long-term excessive consumption of resources. This has taken its toll on the environment and has hindered its sustainable development. We analyzed the comprehensive evaluation of the environmental efficiency and the economic efficiency of Liaoning from 1990 to 2011 and the material flow in 2011. The material input quantity in 2011 was 965.19 million tons, and the local mining quantity was 705.04 million tons, accounting for a material input of 73%; the imported material quantity was 260.15 million tons. This accounts for a material input of 27% based on the MFA of Liaoning. From these results we conclude that the material consumption does not rely on imports, and the local resources meet the needs of economic and social development. The material output quantity is 132.33 million tons, and the material emission quantity is 31.19 million tons, accounting for a material output of 24%. The export total is 101.14 million tons, accounting for 76% of the total. From our analysis of the environmental efficiency of Liaoning from 1990 to 2010 based on the super efficiency Slacks Based Measure (SBM) model, we found that 2010 was the most effective year with the constant returns to scale, and the maximum efficiency was 1.13.

基金项目: 国家社会科学基金青年项目 (14CGL040); 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (13YJC630029); 辽宁省社科规划基金项目 (L13DJY065); 中国博士后科学基金资助项目 (2013M530925)

收稿日期: 2014-07-08; **网络出版日期:** 2015-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: woshifeiwei@sina.com

1991 was the year with the lowest efficiency (maximum 0.47, average 0.98). We conclude that the pure technical efficiency is higher than the comprehensive efficiency, and the scale efficiency restricts the comprehensive efficiency in the evaluation of environmental efficiency. Our analysis of the economic efficiency of Liaoning from 1990 to 2011 based on the super efficiency SBM model showed that the average value of the scale efficiency was 0.98, the average value of the pure technical efficiency was 0.97, and the comprehensive efficiency was 0.96. These values are different from the material flow and environmental efficiency values. This is because the pure technical efficiency restricts the comprehensive economic efficiency of Liaoning, and hence the scale efficiency is higher. From the perspective of input redundancy, the input redundant values of direct material input (DMI) and waste production from regional production processes (DPO) contributed significantly to the DEA model during years with efficiencies less than 1. The investment in fixed assets did not need to change, and the output variable of GDP and the proportion of the tertiary industries, such as service, financial and tourism industries, should have been improved in the years 1993—1996; this would have increased efficiencies to 1 or above. The employment population did not need to change, and the output variable of the proportion of the tertiary industries and Consumer Price Index (CPI) should have been improved in years 2004—2007, 2009, and 2010. These results indicate that the economic level of Liaoning has greatly improved; however, this has been to the detriment of the environment. The growth in secondary industries will result in the consumption of more resources and higher pollution levels. This has to be reduced by promoting tertiary industries, which are less energy dependent and rely on man power; the balance can be readdressed and the quality of the residents' lives will be improved.

Key Words: material flow analysis (MFA); data envelopment analysis (DEA); evaluation of economic and environmental efficiency; Liaoning Province

如何有效处理经济发展与环境污染的关系是可持续发展的前提,而对经济与环境效率的科学评价是明确并处理好两者关系的基础。作为我国老工业基地之一的辽宁省,长期的资源过度消耗、环境严重失衡等问题阻碍了其可持续发展。辽宁省属于资源依赖型重工业区域,对其经济环境效率评价的重点是对物质输入输出的测度,运用物质流分析(MFA)将其经济系统中数据进行物质化处理,依据质量守恒定理进行物料平衡,基于数据包络分析(DEA)综合评价各决策单元(DMU)的资源配置状况,从而为更好处理区域经济与环境之间的关系,为我国区域经济可持续发展提供重要的理论依据。

1 MFA 与 DEA 的相关研究现状

MFA 是在一定时空范围内对特定系统的物质流动和贮存的系统性进行分析或评价的方法。它根据质量守恒定律,客观地反映社会、经济系统的代谢规模,通过物质的输入、贮存和输出三个过程达到最终的物质平衡。MFA 方法在发达国家已经得到了广泛应用。Wernick 和 Ausubel 研究了美国的物质流平衡并提出一套 MFA 的计算框架^[1],世界资源研究所(World Resources Institute)发表了美日德等国有关专家合作研究的 MFA 国际比较研究报告^[2]。2001 年欧盟统计局(European Statistics)提出了第一部经济系统物质流分析研究方法,作为物质流分析的指导性原则被广泛应用^[3]。此后 MFA 的应用被扩展到国家、区域和企业的不同层次^[4-5],并与经济学等理论相结合进行了扩展^[6-8]。目前 MFA 已经成为度量和分析我国区域经济可持续发展的主要方法之一。例如,陈效速等利用该方法分析 1989—1996 年我国经济系统的物质需求总量^[9];李刚分析了我国经济系统的物质输入和输出等相关指标^[10];马宁等基于 MFA 建立了区域循环经济指标体系^[11];陈东景等运用 MFA 分析了生态海岛的物质输入输出状况^[12];张晓刚、曾辉引入景观生态学原理,建构了区域物质流分析的景观取向^[13]。

DEA 是在相对效率概念的基础上发展出来的一种投入产出方法。自 1978 年 Charnes 等基于单输入、单输出的工程效率概念提出第一个 DEA 模型以来^[14],学者们对其进行改进得到诸多 DEA 模型^[15-16],并广泛地

应用于生产、经济、能源等效率评价领域。例如,冯志军、陈伟构造了资源约束型两阶段 DEA 模型,测算我国高技术产业效率^[17];郭贯成、温其玉利用跨期 DEA 测算了我国工业用地生产效率^[18];魏新强、张宝生改进了 DEA 模型的目标函数和约束条件,构建了不同公众环保意识阶段的 DEA 效率分析模型^[19];Huang 等运用三阶段 DEA 模型分析我国 29 个省市的能源效率^[20]。

近年来部分学者将 MFA 和 DEA 相结合分析我国区域发展状况。例如,李丁等对我国 19 个城市的物质流进行核算后,基于 DEA 为城市循环经济政策制定提供了依据^[21];张炳等基于 MFA 构建了区域生态效率评价指标体系,并将污染物排放作为一种非期望输入引入到 DEA 模型中,评价了江苏省生态效率^[22];王义琛等利用 MFA 构建了三层区域生态效率评价指标体系,并结合 DEA 评价了铜陵市区域生态效率^[23];武春友等整合了 MFA 和 DEA 方法,研究并提出了全要素资源效率视角下的煤炭资源效率测算方法^[24];韩瑞玲等利用 1990—2008 年数据分析了辽宁省经济环境系统的物质输入与输出,并检验了物质减量化发展^[25];仇方道等分析了我国东北地区矿业城市可持续发展能力及其影响因素^[26]。这些研究都为本文提供了重要参考,但对具有资源依赖型特征的区域进行全面的物质流、环境、经济效率评价的研究还较为缺乏。因此,本文以物质流过程为分析的结构框架,利用改进的 DEA 模型对辽宁省环境与经济效率进行评价,以效率水平判断区域可持续发展的前景,对促进资源依赖型特征的区域经济可持续发展具有理论价值和实践意义。

2 辽宁省物质流核算

MFA 体系可看成一只独立的黑箱,只考察总体输入与输出(图 1^[27])。图中左端为输入端,主要包括直接开采的生物物质(农林产量)和非生物物质(金属矿物、工业矿物),以及伴随上述物质开采产生的隐藏流、区域外进口物质原料及其产生的隐流。输入到经济系统的物质一部分会成为该系统内部的净资产存量贮存起来,另一部分会通过区域间物质交换,输出到区域外的其它地区。图中右端为输出端,既包括输出到自然环境中的废弃物,又包括使用过程中不可避免的消耗流失量。

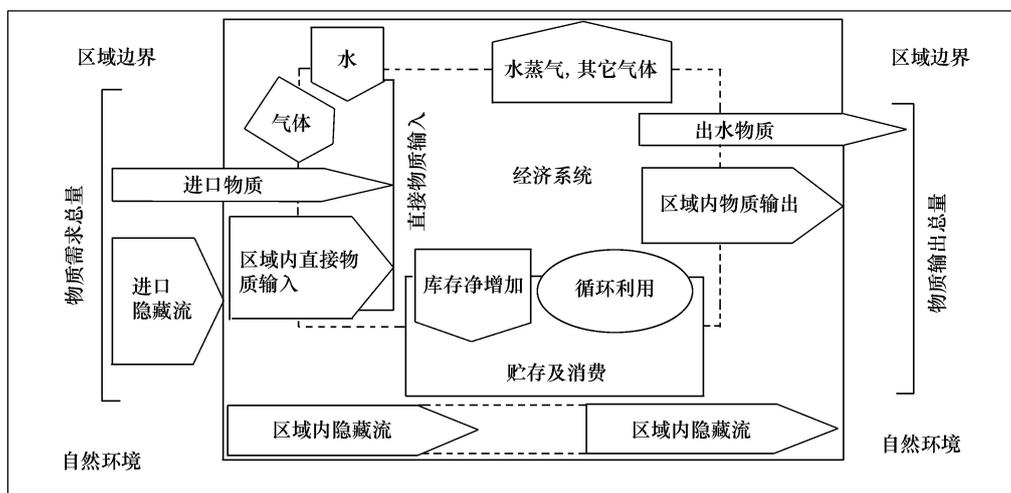


图 1 物质流分析研究框架^[27]

Fig.1 Research framework of MFA

2.1 物质流分析指标体系

根据国际上通用的欧盟统计局(Eurostat)物质流账户体系^[3],参考我国学者的研究成果^[22],结合我国特点本文作了进一步完善,得出区域物质流分析指标体系及计算公式(表 1)。

按照表 1 计算公式,从 1990—2012 年《辽宁省统计年鉴》、《中国矿业年鉴》、《中国环境年鉴》、《中国农业年鉴》、《中国工业经济统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国海关统计年鉴》及《中国港口年鉴》收集原始数据,并按以下内容处理各类数据进行指标核算。

表 1 物质流分析指标体系及计算公式

Table 1 Index system of MFA and its computational formula

分类 Classification	指标 Index		计算公式 Calculation formula
	指标名称 Index name	简称 Abbreviation	
物质输入指标 Material input index	直接物质投入	DMI	区域物质开采+进口
	区域物质投入	TMI	直接物质投入+区域隐藏流
	物质总需求量	TMR	区域物质投入+进口隐藏流
物质输出指标 Material output index	区域生产过程排放	DPO	废物排放+产品浪费和损失
	区域内总输出	TDO	区域内生产过程排放+未使用开采(区域隐藏流)
	直接物资输出	DMO	区域生产过程排放+区域出口
	区域物资输出	TMO	直接物资输出+国际出口

(1) 物质 针叶林取 $1\text{m}^3/\text{t}$, 其他木材取 $1.2\text{m}^3/\text{t}$ 。渔业产量由天然水产品产量和人工养殖的海洋捕捞量计算。饲草消耗量按国际规定每头牛每天消耗 12kg, 其它牲畜依据消耗比例系数进行计算, 其中羊、牛、马、驴、骡、猪的饲草消耗比例为 1:5:6:3:6:2。

(2) 化石燃料和矿物物质 平板玻璃重量按 50kg/箱换算。水泥锻造有立窑法和干法两种, 立窑法中石灰石、粘土、石膏之比为 1.00003:0.156:0.0529, 干法中三者之比为 1.14:0.0192:0.072。

(3) 建筑材料 本文主要考虑了砖混、框架和剪力墙三种建房结构。在真实建筑中需要大量水输入, 因为代谢研究只计算部分消耗, 所以材料输入情况如表 2 所示。

表 2 建筑结构体系材料输入情况

Table 2 Material input of construction system

结构体系 Structural system	砖混结构 Brick-concrete structure	框架结构 Frame structure	剪力墙结构 Shear wall structure
砖 Brick /t	2230.845	1346.375	0
水泥 Cement /t	658.91	1259.784	4875.416
砂 Sand /t	1436.539	2098.865	13728.16
石子 Stone /t	1889.155	3608.437	17815.25
钢筋 Concrete iron /t	175.74	399.778	1379.249
水 Water /t	305.944	525.224	2921.838
白灰 Lime /t	0.015	22.275	137.085
煤渣 Cinder /t	1.103	189.855	0
保温板 Insulation board /t	174.816	1.848	690.16
总计 Total/t	6873.067	9452.441	41547.16

道路建设的砂石消耗量为 $1.578\text{t}/\text{m}^3$, 排水管网的砂石消耗量为 $17\text{t}/\text{m}$

(4) 进出口核算 一个区域层面的 MFA 进出口既涵盖了国际间的进出口贸易, 又包含了国内地区间的物质交换。本文基于辽宁省物质产量和需求数量的分析, 将辽宁省的进出口合计设定为三部分: 生活消费进出口、能源进出口以及国际间进出口。其中生活消费进出口核算依据公式“省际间进出口 = 消费 + 储存 - 生产”。能源消耗量及进出口数据来自《辽宁省统计年鉴》, 并且将其中不以重量为消费单位的数据通过质量系数统一换算, 少量数据缺口按照插入法进行估算。

(5) 气体输入 化石燃料燃烧耗氧量 = $\text{CO}_2 \times 0.73 + \text{SO}_2 \times 0.5$ 。CO₂ 的产量按照如下计算: $M(\text{CO}_2)$ (折合成碳) = $\sum P_i F_i C_i$, 式中 P_i 为第 i 种化石燃料 (i = 原煤、原油或天然气) 的消耗量; F_i 为第 i 种化石燃料的有效氧化系数, 原煤、原油和天然气的有效氧化系数分别为 0.982、0.918 和 0.98; C_i 为单位燃料含碳量, 每吨标准煤的煤、燃油和燃气的平均含碳量分别为 0.85、0.707 和 0.403。相应的氧气需求量按照 $n(\text{CO}_2)/n(\text{O}_2) = 1$ 推算。

计算生物耗氧时,根据 Matthews 等^[28]提出的每种动物呼吸系统耗氧量,依据有氧呼吸方程式: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O$,得出呼吸释放的二氧化碳和水蒸气数值,并按照 $n(CO_2)/n(O_2) = 1$ 进行推算,具体呼吸系数如表 3 所示。

表 3 人和动物的呼吸系数

Table 3 Respiratory coefficient of people and animals

类别 Classification	牛 Cattle	羊 Sheep	马 Horse	猪 Pig	家禽 Poultry	人 Person
二氧化碳 CO ₂ Carbon dioxide (t/a)	2.92	0.237	2.19	0.301	0.013	0.3
水蒸气 Steam (t/a)	3.376	0.274	2.532	0.348	0.015	0.35
氧气 O ₂ Oxygen gas (t/a)	2.449	0.199	1.836	0.253	0.011	0.25

此外,每公顷农田年均耗氧量为 12.41t。植物光合作用吸收的二氧化碳量则可近似利用农林业产品和经济作物产量的 1.47 倍计算。

(6) 水输入输出 在本文研究期内,辽宁省水的输入输出量物质重量均占 80% 以上。为了不影响统计结果和便于比较,本文将水的输入输出单独列出,计算中仅包含少量的物质水分。

(7) 隐藏流核算 隐藏流是一种未被有效利用,但为了获得有用物质而必须开采而产生的废弃物。计算进出口非生物产品隐藏流时,要将进出口贸易的货品折算为原料吨当量(RME),再根据原料吨当量的种类进行隐藏流计算。化石燃料和矿石隐藏流系数见表 4^[6]。

表 4 隐藏流估算系数

Table 4 Estimation coefficient of hidden flow

物质种类 Type of material	隐藏流系数 Coefficient of hidden flow	适用国家或地区 Applicable country or region	物质种类 Type of material	隐藏流系数 Coefficient of hidden flow	适用国家或地区 Applicable country or region
原煤 Raw coal	2.36	中国	原盐 Crude salt	1.3	欧盟
原油 Crude oil	1.22	德国	铜原矿 Copper ore	1.84375	中国
天然气 Natural gas	1.66	德国	铜精矿 Copper concentrate	126.4108	中国
铁矿石原矿量 Crude quantity of iron ore	1.966	中国	铁 Iron	1.8	德国
铁矿石成品矿 End product of iron ore mine	8.542	中国	钛 Titanium	232	德国
混凝土 Concrete	10	世界平均	铅 Lead	2.36	德国
大理石 Marble	3	中国台湾	原铝 Virgin aluminum	1350.416	中国
石灰石 Limestone	4	中国台湾	氧化铝 Alumina	28.50825	中国
石膏 Gypsum	0.5	美国	铝土矿 Bauxite	6.53125	中国
粘土 Clay	0.8	德国	锰 Manganese	2.3	德国、美国
砂与碎石 Sand and macadam	0.65	世界平均	镍 Nickel	17.5	德国
水泥 Cement	4.38142	2008 之前	锌 Zinc	2.36	德国
	4.7496	2008 之后	成品与半成品 Finished product and semi-finished product	4	中国台湾

土石挖方量用以下公式进行估算:年营建剩余土石方量 = 当年竣工面积(m²) × 3.2(m) × 1.55(t/m³)。计算土壤流失隐藏流时,本文采用 15t/hm² 的土壤流失率。筑路物质投入见表 5。

(8) 废水废气废物的排放 本文仅选用氨氮排放量和化学需氧量两个指标。由于相关年鉴的氨氮排放量只有 2002—2011 年的数据,化学需氧量只有 1998—2011 年的数据,因此其他年度的污染排放物数据需要估算。

氨氮排放量估算公式为 $AN_i = P_i \times \frac{1}{10} \sum_{j=2002}^{2011} AN_j / P_j$, 式中 AN_i 、 AN_j 分别代表第 i 年和第 j 年的氨氮排放

量; P_i, P_j 分别代表第 i 年和第 j 年辽宁省总人口 $AN_i = P_i \times \frac{1}{10} \sum_{j=2002}^{2011} AN_j / P_j$ ($1990 \leq i \leq 2001, 2002 \leq j \leq 2011$)。同理可计算化学需氧量数据。在固体废弃物中, 医疗废弃物质量 = $3.4\text{kg/d} \times \text{床位} \times \text{总病床数} \times \text{占床率}$ (60%) $\times 365\text{d}$ 。

(9) 化肥平均利用率 辽宁省统计数据中没有各种肥料的具体利用率, 因此本文按照化肥平均利用率 30% 统一计算。

表 5 每千米筑路的主要物质投入

Table 5 Main material input of road building for per kilometer

材料及能源 Material and energy	单位 Unit	普通公路 Ordinary road	等级公路 Classifier highway	高速公路 Highway
砂石 Sandstone	m^3	0.56	0.85	0.92
砂石 Sandstone	t	1.0416	1.581	1.7112

2.2 物质流全景分析

根据上述指标体系对 1990—2011 年辽宁省物质流进行核算可得物质输入和输出的变化趋势分别如图 2 和图 3 所示。由图 2, 近年来辽宁省物质输入呈现逐年递增趋势, 直接物质投入 (DMI) 增加相对较为平缓, 年均递增速度为 8.58%; 区域物质投入 (TMI) 和物质总需求量 (TMR) 增长趋势较为显著 (尤其是在 2004 年以后), 年均递增速度分别为 8.96% 和 9.18%, 两者在 1990—2004 年间相差较小、几乎重合, 而后 TMR 明显高于 TMI, 主要是由于进口隐藏流量的增多所致。

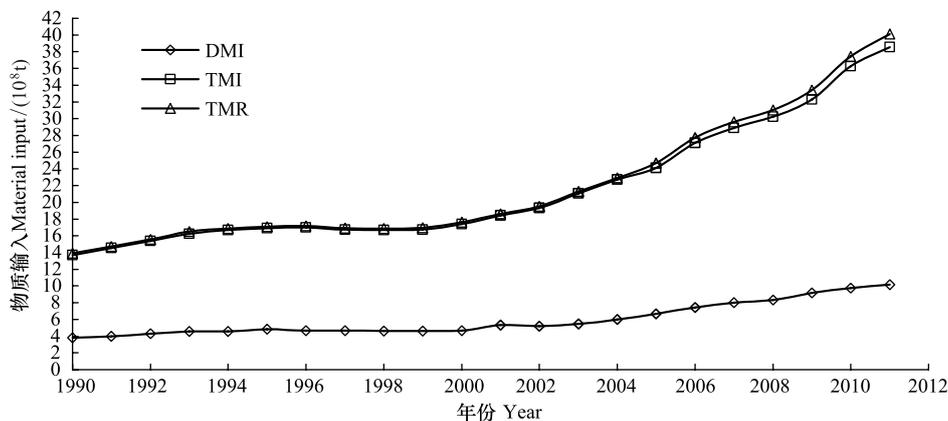


图 2 1990—2011 年辽宁省物质输入

Fig.2 Material Input in Liaoning Province from 1990 to 2010

由图 3, 近年来辽宁省物质输出呈现波动式递增, 与物质输入相对应的是 2004 年后物质输出也呈现显著递增趋势。其中区域生产过程排放 (DPO) 变化较为平缓, 年均变化速度为 0.88%, 在 2000—2004 年间呈现平稳递减趋势; 直接物资输出 (DMO) 和区域物资输出 (TMO) 变化曲线几乎重合, 说明在此期间国际出口量并不是很大; 区域内总输出 (TDO) 略低于它们, 但变化趋势与之相似, TDO、DMO 和 TMO 年均递增速度分别为 4.03%、4.05% 和 4.02%, 也较为相近。

根据物质流指标核算分析得出 1990—2011 年辽宁省物质流全景, 选择了最近一年即 2011 年物质流全景进行列示说明见图 4。辽宁省输入物质共计 96519.17 万 t。其中本地开采 70504.2 万 t, 占省内物质输入的 73%; 进口物质质量 26015.01 万 t, 仅占省内物质输入的 27%。说明辽宁省物资消费并不主要依赖于进口, 本地资源基本可以满足经济社会发展需要。辽宁省输出物质共计 13233.22 万 t, 物质排放 3119.3 万 t, 占有所有输出的 24%; 出口物资 10113.92 万 t, 占总额的 76%。虽然年度净存量达到 83285.95 万 t, 但是大量的物质输出和环境生态包袱, 在一定程度上揭示了经济社会运行给环境带来的巨大压力。

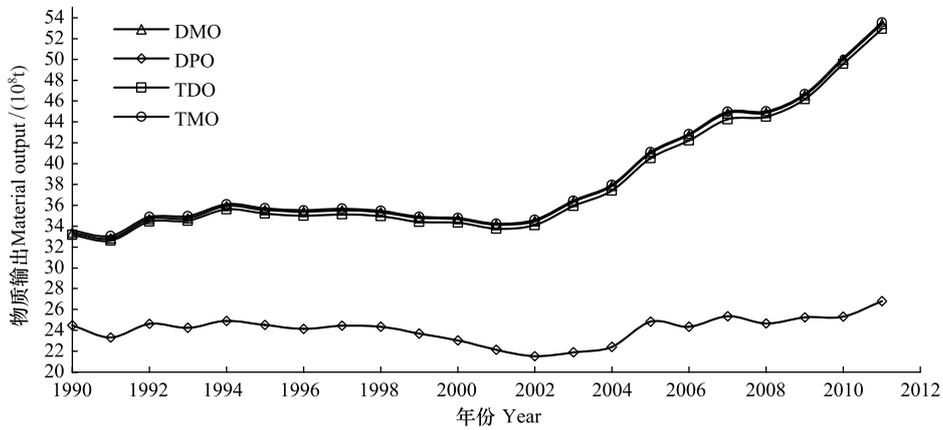


图 3 1990—2011 年辽宁省物质输出

Fig.3 Mterial Output in Liaoning Province from 1990 to 2010

图 5 和图 6 分别给出了本地直接开采和物质排放分类的比例。在图 5 中,金属矿物的比重占 46%,工业矿物比重占 10%,化石燃料比重占 12%,三者总比重达到了 68%;而生物物质的开采量仅为 6%。数据表明:辽宁省仍然在以资源开采作为主要经济活动。虽然在短期内该活动可以产生较高的经济收入,但是由于金属、煤炭均为不可再生资源,其累计开采量达到一定程度后,不仅这种高收入难以继续,而且还会对环境造成不可弥补的破坏。图 6 的物质排放种类显示:辽宁省固体废物的排放量约为 2500 万 t,远超其它物质。因此,对固体废物的无害化处置将是辽宁省近年来环境保护工作的重点。

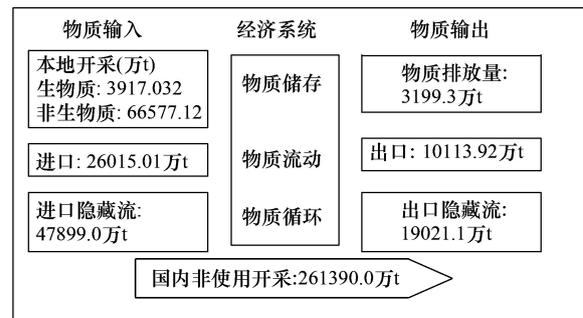


图 4 2011 年辽宁省物质流全景

Fig.4 Material flow panorama of Liaoning province in 2011

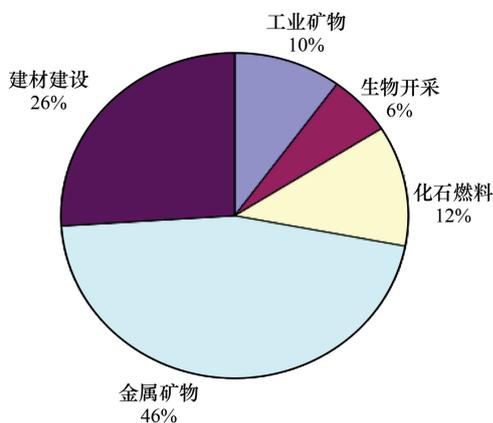


图 5 2011 年辽宁省直接开采百分比

Fig.5 Direct exploitation percentage of Liaoning province in 2011

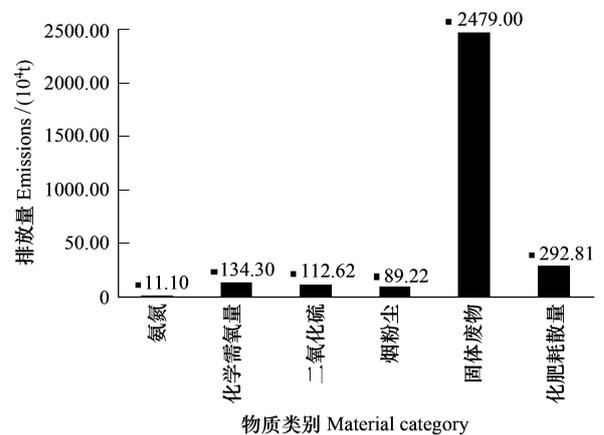


图 6 2011 年辽宁省物质分类的排放量

Fig.6 Emissions of material classification of Liaoning province in 2011

3 辽宁省经济环境效率评价

根据辽宁省物质流分析结论及其自身区域特征,基于国内外区域环境、经济效率评价的指标选取方法,本

文利用 DEA 改进模型,选用 DEA-SOLVER PRO5 软件作为计算平台对辽宁省环境、经济效率进行整体评价。

3.1 环境效率评价

根据 DEA 模型输入输出特点,结合国内外关于环境效率评价的研究^[29],并且考虑到辽宁省环境现状以及数据可得性,将物质流分析所得的污染物相关指标数据作为输入进行环境效率分析。选取废水中的污染指标“氨氮”和“化学需氧量”,废气中指标“二氧化硫”和“工业烟粉尘”,以及化石燃料燃烧和呼吸系统中产生的“二氧化碳”排放量作为输入指标。其中没有选取固体废物作为输入指标是因为固体排放中有大量的人与动物粪便,它们对环境的作用力不全属于破坏和消耗类,所以对固体废物的影响予以忽略。输出指标为“工业废水达标率”、“工业烟粉尘去除量”、“固体利用率”以及“城市人均绿化面积”。它们可以分别代表水环境、大气环境、固体废物以及狭义的生态环境体系。

传统 DEA 模型无法有效解决投入产出的松弛性。由 Tone^[30]于 2001 年提出的非径向 DEA 模型——SBM (Slacks-based measure)模型,是基于松弛变量评价效率的方法。它直接将松弛变量加入到目标函数中,使实际利润最大化而不是仅得到效益比例最大化。根据环境效率输入输出指标,由于 2011 年废水达标率和烟粉尘去除量等指标数据缺失,为确保效率评价的准确性,本文对环境效率评价的年份为 1990—2010 年,利用 SBM 模型评价辽宁省环境效率。基于规模报酬不变的 SBM 模型分析得到 7 个年份是 DEA 有效的。基于规模报酬可变的 SBM 模型分析有 15 个年份是 DEA 有效的。由于 DEA 有效的年份较多,因此无法有效区分效率的优劣。基于此,超效率 SBM 模型是解决多数决策单元效率为 1 而设计改进的一种 DEA 模型。该方法不再限定决策单元的效率值小于或等于 1,解决了有效决策单元过多的问题。进一步利用超效率 SBM 模型分析的结果表明:规模报酬不变模型分析的最有效的一年为 2010 年,最大综合效率值为 1.13;而综合效率最低的一年为 1991 年,最小效率值仅为 0.47,综合效率平均值为 0.74。规模报酬可变模型分析的最有效的年份仍为 2010 年,最大纯技术效率值为 1.13,2000 年纯技术效率最低为 0.77,纯技术效率平均值为 0.98。并且超效率 SBM 模型分析结果中纯技术效率高于综合效率,说明环境效率评价中规模仍是制约综合效率的因素。

根据超效率 SBM 模型分析得到的结果估算出规模效率、综合效率、纯技术效率和规模效率曲线变化趋势如图 7 所示。由图可见:1990—2010 年辽宁省环境的纯技术效率曲线始终围绕效率值 1 小幅波动变化,只有 1991—1993 年、2000—2001 年呈现显著的下降波动。并且它普遍高于综合效率、规模效率两条曲线,尤其是在 1991—1999 年区间。规模效率与综合效率曲线除了 1992—1993 年、2000—2001 年出现显著偏离,即规模效率高于综合效率,其它年份两条曲线近似重合。说明辽宁省环境的综合效率主要是受到规模因素影响而显著低于纯技术效率。近年来辽宁省通过采取环境保护措施,加大环保设施建设力度以及提升生产技术水平等,提高了辽宁省环境效率水平。例如,从 2008 年起辽宁省财政每年安排 2.2 亿元的专项环保资金;1999—2011 年辽宁省治理工业污染项目投资额的环比平均增长率约为 13.41%。由此省内环境保护已经取得了显著成效,如 2011 年省内环境污染事故仅发生 2 次;城市日处理污水能力达到 547.2 万 m³,与 2000 年相比累计增长了约 3.94 倍。然而相对于比重突出的第二产业传统生产模式所遗留的环境污染严重、物质输出质量增加等问题,保持目前的纯技术效率,发挥环保技术优势,进一步优化环境资源配置,适当扩大环境保护规模,将是提高辽宁省环境效率的主要途径。

3.2 经济效率评价

为突出区域经济可持续发展的研究目标,对经济效率评价的输入和输出指标的选取主要从经济发展、产业结构和生态环境三大方面进行。将物质流分析所得的直接物质投入(DMI)、区域生产过程排放(DPO)、就业人口和固定资产投资额作为输入变量。其中“DMI”和“DPO”代表经济体系中的物质环境投入;“就业人口”反映了劳动力资源的实际利用情况;“固定资产投资额”反映了固定资产的投资规模和投资速度。用这三个指标分别代表辽宁省的环境、人力和资本投入。将“GDP”、“第三产业占 GDP 比重”和“居民消费水平指数”作为输出变量。其中“GDP”是衡量一个国家和地区经济状况的基本指标;“第三产业占 GDP 比重”反映了一个国家或地区所处的经济发展阶段;“居民消费水平指数”反映了居民在物质产品和劳务消费过程中的

满足程度。

基于 SBM 模型的经济效率评价结果仍有较多年份是 DEA 有效的,所以进一步利用超效率 SBM 模型对辽宁省经济效率进行评价。根据经济效率评价结果,可得综合效率的平均值为 0.96、纯技术效率的平均值为 0.97 和规模效率的平均值为 0.98,效率水平整体较高。三条效率曲线变动趋势如图 8 所示。其中规模效率曲线没有较大波动,相对较为平稳。综合效率与纯技术效率曲线变化趋势几乎一致,在 1990—1998 年它们都有较明显的“V”型波谷,随后经历了一段较为平稳的时期,在 2010—2011 年呈现上涨趋势。与环境效率分析结果不同的是:制约辽宁省经济综合效率的因素是纯技术效率,相比之下规模效率是普遍有效的。

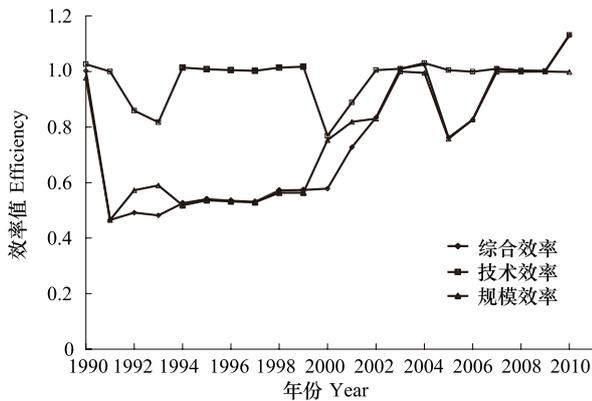


图 7 1990—2010 年辽宁省环境效率变动趋势

Fig.7 Environmental efficiency trends in Liaoning Province from 1990 to 2010

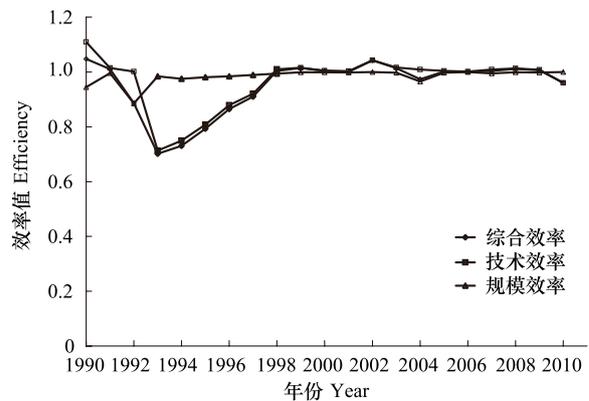


图 8 1990—2011 年辽宁省经济效率变动趋势

Fig.8 Economic efficiency trends in Liaoning Province from 1990 to 2011

表 6 列出了每个 DEA 无效年份的松弛变量需要改进的数值。其中用 $S^-(1)$ 、 $S^-(2)$ 、 $S^-(3)$ 和 $S^-(4)$ 分别代表 DMI、DPO、就业人口和固定资产投资额的输入冗余,用 $S^+(1)$ 、 $S^+(2)$ 和 $S^+(3)$ 分别代表 GDP、第三产业占 GDP 比重和居民消费水平指数的输出不足。输入冗余方面,在 DEA 无效的年份中,DMI 和 DPO 的输入冗余值 S^- 显著存在,其中 DPO 输入冗余值只在 1994 年为 0。而固定资产投资额在 1993—1996 年的 4 个 DEA 无效年份中无需变动,就业人口在 2000—2011 年的 6 个 DEA 无效年份中无需变动,即 2004—2007 年、2009 年和 2010 年。该结果表明:要提高辽宁省整体经济效率,减少直接物质投入和区域生产过程排放是主要途径;近年来固定资产投资额也有待适量调整,尤其是应结合产业结构特征对第二产业的投资进行有效调整;就业人口规模已经逐渐得到优化。相比于输入方面的数值改进量普遍较大,输出方面的产出变动数值则较少。在 1993—1996 年的 4 个 DEA 无效年份中,需要提升的输出值变量为 GDP 和第三产业比重,而在 2000—2011 年的 6 个 DEA 无效年份中,需要提升的输出值变量为第三产业比重和居民消费水平指数。说明近年来辽宁省经济水平得到了显著提高,但是产业结构仍需调整,居民生活质量水平有待进一步提高。以 2010 年为例,辽宁省 GDP 为 18457.3 亿元,与 2000 年相比增长了约 2.9 倍,而同一时期全国 GDP 增长了 1.8 倍。辽宁省三次产业占 GDP 的比重为 8.9:54:37.1,第二产业仍占主导作用,第三产业比重亟待提升。城镇居民人均可支配收入为 17713 元,而同期全国城镇居民人均可支配收入为 19109.4 元。

根据环境和经济效率的分析可见,尽管近年来辽宁省经济高速增长,产业结构有所调整,但产业结构特征仍然是第二产业所占比重较大且逐年上升。与之相应的是以煤炭、矿石等能源矿物为主的资源开采规模增大,实际资源利用率下降,环境的规模及综合效率都有待改善。因此,在存量上改造提升传统产业,在增量上培育发展战略性新兴产业,加强技术进步,建设适应需求结构调整和消费升级新变化的现代产业体系将是辽宁省未来可持续发展的战略目标。

表 6 1990—2011 年辽宁省经济效率输入和输出的优化结果

Table 6 Input and outputs optimization of economic efficiency in Liaoning Province from 1990 to 2011

年份 Year	效率值 Efficiency value	输入冗余 Input surplus				输出不足 Output lack		
		S ⁻ (1)	S ⁻ (2)	S ⁻ (3)	S ⁻ (4)	S ⁺ (1)	S ⁺ (2)	S ⁺ (3)
1990	1.04	688.54	0.00	0.00	18.68	0.00	1.59	0.00
1991	1.05	0.00	0.00	24.23	0.00	0.00	0.76	11.48
1992	1.02	0.00	0.00	13.62	0.00	0.00	0.00	4.61
1993	0.86	1467.52	724.11	5.70	0.00	705.75	2.94	0.00
1994	0.87	594.89	0.00	71.84	0.00	871.74	1.47	0.00
1995	0.89	3136.12	752.60	73.63	0.00	554.84	1.81	0.00
1996	0.94	665.52	1461.78	75.78	0.00	156.89	1.71	0.00
1997	1.01	0.00	0.00	18.22	3.30	0.00	0.00	1.49
1998	1.01	1152.37	0.00	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00
1999	1.01	0.00	190.18	0.00	35.24	0.00	0.56	0.00
2000	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.82	0.00	0.00
2001	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.24	0.00	0.00
2002	1.02	0.00	390.28	30.54	0.00	230.08	0.22	0.00
2003	1.00	0.00	0.00	23.07	0.00	35.39	0.00	0.00
2004	0.93	3869.91	1641.84	0.00	317.84	0.00	0.02	4.96
2005	0.94	7218.50	1492.70	0.00	220.38	0.00	0.63	0.08
2006	0.92	10684.84	1250.10	0.00	433.74	0.00	0.08	4.54
2007	0.92	11877.93	1543.44	0.00	419.78	0.00	0.49	2.92
2008	1.01	0.00	0.00	48.57	0.00	0.00	0.00	0.00
2009	0.92	9112.34	1360.10	0.00	1412.73	0.00	1.18	2.75
2010	0.93	5156.54	977.32	0.00	1995.57	0.00	1.31	1.38
2011	1.05	0.00	0.00	48.46	0.00	3005.93	0.00	0.00

4 结语

对经济与环境效率的科学评价是实现区域可持续发展的前提。本文基于 MFA 与 DEA 以辽宁省为例,对区域经济环境效率进行了评价。物质流分析结果显示:1990—2011 年辽宁省物质输入和输出均呈现递增趋势,以 2011 年为例辽宁省输入物质为 96519.17 万 t,其中本地开采占省内物质输入的 73%;输出物质为 13233.22 万 t,其中物质排放占有所有输出的 24%,出口物资占总量的 76%。说明辽宁省本地资源丰富,物资消费不主要依赖于进口,向其它地区物质输出量大。基于 DEA 的 1990—2011 年辽宁省环境效率评价的综合效率主要受规模因素的影响而显著低于纯技术效率,而整体经济的综合效率却主要受纯技术效率影响而下降。造成上述结果的主要因素是产业结构不合理(即第二产业比重依然偏大,第三产业有待进一步发展)所致的环境污染严重、资源消耗大等问题。尽管近年来辽宁省加大了环保投入并采取产业升级等措施使这些问题有所改善,但进一步改造提升传统产业,发展战略性新兴产业,提高第三产业发展水平,扩大环保规模、提高环保技术水平,促进居民生活质量水平全面提升,仍将是辽宁省以及与之相似的资源依赖型区域可持续发展的方向。

参考文献 (References):

- [1] Wernick I K, Ausubel J H. National material metrics for industrial ecology. *Resources Policy*, 1995, 21(3): 189-198.
- [2] World Resources Institute. *The Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies*. Washington D C: World Resources Institute, 1997.
- [3] European Statistics. *Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: A Methodological Guide*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.

- [4] Kytzia S, Faist M, Baccini P. Economically extended—MFA: a material flow approach for a better understanding of food production chain. *Journal of Clean Production*, 2004, 12(8-10): 877-889.
- [5] Hubacek K, Giljum S. Applying physical input-output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities. *Ecological Economics*, 2003, 44(1): 137-151.
- [6] Schuetz H, Bringezu S. *Economy-wide Material Flow Accounting (MFA)-Technical Documentation*. Germany: Wuppertal Institute, 1998.
- [7] Bouman M, Heijings R, Van der Voet E, van den Bergh J C J M, Huppes G. Material flows and economic models: an analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models. *Ecological Economics*, 2000, 32(2): 195-216.
- [8] Brunner P H, Rechberger H. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers, 2004.
- [9] 陈效逯, 乔立佳. 中国经济——环境系统的物质流分析. *自然资源学报*, 2000, 15(1): 17-23.
- [10] 李刚. 基于可持续发展的国家物质流分析. *中国工业经济*, 2004, 22(11): 11-18.
- [11] 马宁, 鞠美庭, 楚春礼. 基于 MFA 的区域循环经济评价指标体系研究. *生态经济*, 2010, 26(7): 55-57.
- [12] 陈东景, 郑伟, 郭惠丽, 付元宾. 基于物质流分析方法的生态海岛建设研究——以长海县为例. *生态学报*, 2014, 34(1): 154-162.
- [13] 张晓刚, 曾辉. 从系统到景观: 区域物质流分析的景观取向. *生态学报*, 2014, 34(6): 1340-1351.
- [14] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [15] 何红渠, 谢雄军. 基于 LCA-MFA 方法的循环经济产业链规划技术与其应用. *经济地理*, 2013, 33(10): 117-123.
- [16] 张丽君, 秦耀辰, 张金萍, 路超君. 基于 EMA-MFA 核算的县域绿色 GDP 及空间分异——以河南省为例. *自然资源学报*, 2013, 28(3): 504-516.
- [17] 冯志军, 陈伟. 中国高技术产业研发创新效率研究——基于资源约束型两阶段 DEA 模型的新视角. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(5): 1202-1212.
- [18] 郭贯成, 温其玉. 环境约束下工业用地生产效率研究——基于中国 33 个典型城市非期望产出的考量. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(6): 121-127.
- [19] 魏新强, 张宝生. 不同环保意识视角下的 DEA 效率模型. *运筹与管理*, 2014, 23(3): 202-208.
- [20] Huang D C, Dong Y Y, Zhang C Z, Liu B S. Regional energy efficiency in China based on a three-stage DEA model. *Journal of Resources and Ecology*, 2014, 5(2): 97-104.
- [21] 李丁, 汪云林, 付允, 牛文元. 基于物质流核算的数据包络分析——国内 19 个主要城市的实证研究. *资源科学*, 2007, 29(6): 176-181.
- [22] 张炳, 黄和平, 毕军. 基于物质流分析和数据包络分析的区域生态效率评价——以江苏省为例. *生态学报*, 2009, 29(5): 2473-2480.
- [23] 王义琛, 王远, 朱晓东, 吴小庆, 王珂, 任克秀, 陆根法. 安徽省铜陵市生态效率变化及其驱动因素. *应用生报*, 2011, 22(2): 460-466.
- [24] 武春友, 岳良文, 张米尔. 基于 MFA 和 DEA 的煤炭资源效率测算方法的研究. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(12): 135-142.
- [25] 韩瑞玲, 佟连军, 佟伟铭. 基于 MFA 与 DEA 分析的辽宁省物质减量化检验研究. *地理研究*, 2012, 31(4): 652-664.
- [26] 仇方道, 李博, 佟连军. 基于 MFA 和 DEA 的东北地区矿业城市可持续发展能力评价. *资源科学*, 2009, 31(11): 1898-1906.
- [27] 黄和平, 毕军, 张炳, 李祥妹, 杨洁, 石磊. 物质流分析研究述评. *生态学报*, 2007, 27(1): 368-379.
- [28] Matthews E, Bringezu S, Bringezu S, Hüttler W, Ottke C, Rodenburg E, Rogich D, Schandl H, Van Der Voet E, Weisz H, Billings H. *The Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies*. Washington D C: World Resource Institute, 2000.
- [29] 卞亦文. 基于 DEA 理论的环境效率评价方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- [30] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 143(1): 32-41.