

基于 MFA 与 DEA 分析的辽宁省物质 减量化检验研究

韩瑞玲^{1,2}, 佟连军¹, 佟伟铭³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 东北师范大学城市与环境学院, 长春 130024)

摘要: 选择老工业基地的核心代表——辽宁省作为研究对象, 分析其物质流账户指标, 判断了 1990~2008 年辽宁省直接物质投入、生产过程排放及物质总需求 3 个账户指标的走向趋势; 运用数据包络分析 (DEA) 方法分析物质流账户 (MFA) 主要指标的综合效率, 明确了辽宁省物质减量化的急切任务, 对辽宁省物质流减量化发展历程进行了检验研究。研究发现: (1) 辽宁省经济增长的物质投入减量化趋势存在, 物质投入对环境的破坏表现仍然比较突出。(2) 辽宁省直接物质投入与生产过程排放各自的综合效率呈增长趋势, 总体平均效率较低, 即经济发展伴随着物质投入的相对饱和及废物排放对环境的破坏。(3) 辽宁省物质减量化的反弹效应升高, 表现为随直接物质投入的增加, 环境压力将更加严峻; 减量效应的波动变化影响了相应年份的物质投入与排放。(4) 1990~2008 年, 辽宁省共减少直接物质投入 22.88 亿 t、减少生产过程排放 5.82 亿 t; 潜在物质减量指数高于潜在废物减排指数, 折射出由于直接物质投入的持续增长, 将会导致废弃物的进一步过度排放; 物质减量化总缺口与废物减排总缺口均大于 0, 说明辽宁省物质减量化和废物减排潜力得到一定程度实现, 但是与理想状态还有较大差距。

关键词: MFA; DEA; 物质利用效率; 物质减量化; 辽宁省

文章编号: 1000-0585(2012)04-0652-13

1 引言

物质流分析 (MFA) 是衡量环境保护和经济发展的主要内容之一^[1], 其主要用来评价区域可持续性的发展状态^[2]。一般而言, 区域物质需求总量越小, 输出到环境中的废物就越少, 环境的质量也就越好, 经济系统运行的可持续性则越强; 反之亦然^[3]。MFA 研究主要通过经济系统的物质输入量及经济系统的废物输出量作为环境压力和可持续发展程度的示踪指标, 用以定量确定特定区域经济与环境之间的关系^[4, 5], 进而提出相应的减少环境压力的解决方案, 为实现可持续发展目标提供科学依据。

最早涉及 MFA 的文献可以追溯到 1968 年 Ayres 和 Kneese 的文献^[6, 7]。20 世纪 90 年代初, 德国 Wuppertal 研究所提出了物质流账户体系, 用以定量测度经济系统运行中物

收稿日期: 2011-03-13; 修订日期: 2011-11-15

基金项目: 国家自然科学基金 (41071086、40901065)。

作者简介: 韩瑞玲 (1984-), 女, 河北文安人, 博士研究生, 主要从事区域发展等研究。

E-mail: hanruling@neigae.ac.cn

通讯作者: 佟连军 (1960-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事经济地理与生态经济研究。

E-mail: tonglj@neigae.ac.cn

质使用量，并提出了生态包袱的概念，后来也称其为隐藏流（Hidden Flow）。1996 年，欧盟委员会组建了“ConAccount”平台^[8]。1997 年 World Resource Institute 发表了美国、日本、德国、荷兰等国有关专家合作研究的 MFA 国际比较研究报告^[9~11]。2001 年欧盟统计局（Eurostat）公布了 MFA 指标的指导性原则文件^[12]。之后，2007 年 Eurostat 发布了经济系统物质流账户编写手册^[13]，对 MFA 研究方法进行了发展。国内关于 MFA 方法的运用研究出现在 2000 年以后^[6]。一是利用物质流分析方法，对我国经济系统的物质输入与输出进行了研究^[14~16]，二是对省份^[1, 6]和城市^[4, 17, 18]的物质流进行了研究。三是将 MFA 作为循环经济、可持续发展经济或低碳经济的重要工具给予具体分析^[19, 20]。从总体看，国内外已有的 MFA 研究多考虑了物质投入数量，较少考虑投入质量；多以国家尺度为研究对象，对于中小尺度的研究数量不多，且不够深入^[8]。

近年来，有学者对经济—环境系统物质流账户的效率问题进行了研究，但涉及的物质流账户相对不完整^[4]，且不是以物质流账户为核心内容进行的效率核算^[21]，多是以物质流账户做为指标选取标准而进行的生态效率研究；也有一些学者对物质减量化作了研究^[22]，但其并未揭示研究区域物质减量化的程度和潜力。本文参照前人研究，对经济—环境系统的物质流账户指标进行了完善和补充，如加入了医疗废弃物、生物呼吸耗氧量、建筑挖方量等指标，且核心内容围绕物质流账户，进行了物质代谢、物质利用效率、物质流减量化效应分析、物质流减量化检验的逐步递进研究，在尽量保证物质流账户指标体系全面具体的基础上，保证物质流利用效率及减量化研究的准确性，并且充分考虑了物质投入对环境的影响，使研究内容更深入。

本文利用 Eurostat 提出的 MFA 指标体系构建相对完整的物质流账户，以此为依据，对辽宁省经济—环境系统的物质输入与输出作深入分析，对物质流账户利用的综合效率进行 DEA 评价，进而以物质排放的减量化为目标，对辽宁省物质减量化发展给予检验，以判定其物质减量化发展态势和发展潜力。辽宁省是我国东北老工业基地之一，重化工业占主导地位，工业污染负荷比重大，生态破坏较严重，将其作为研究对象，具有理论的充实性和区域的示范性，可对其他老工业基地省份的经济—环境协调发展起到借鉴作用。

2 物质流账户分析

2.1 物质流账户构建

物质流分析遵循质量守恒定律，其认为人类活动所投入到经济系统的资源和物质可产生对环境产生影响，引起资源消耗^[8]，而经济系统排放到自然系统的废弃物质又引起环境污染；其通过分析人类对自然资源与物质的消耗与排放等过程，揭示物质在特定区域内的流动特征和转化效率，以找出环境压力的直接来源。物质流账户是依据 MFA 原理，通过测度经济—环境系统之间的物质吞吐量，来描述进入经济系统的物质输入量，及排放到自然系统的废弃物质量。本文主要参照国际上较通用的 Eurostat 所制定的物质流账户体系^[12]进行计算（表 1）。

物质流账户的所有计算项目均以质量为计算单位^[2]。由于 MFA 账户涉及数量较大，为使研究可行并具有科学性，对进入物质流核算的物质成分按如下要求筛选：首先，尽可能保持与 Eurostat 的 MFA 估算方法体系一致；其次，与辽宁省社会经济发展密切相关；最后，与可获取的辽宁省现有统计资料相结合，以保证物质流计算的完整性和连续性^[24]。在计算物质输入过程中，需要说明以下几点：（1）农产品质量的核算数据按估算值进行，

表 1 物质流分析基础指标及其核算关系

Tab 1 The basic analysis indicators of material flow and their accounting relations

分类	指标名称		核算规则	平衡核算关系
	缩写	全称		
投入	I	进口		
	HF	国内隐藏流		
	IF	进口隐藏流		
	DMI	直接物质投入	$DMI = \text{国内原料}^{\text{①}} + I$	$DMI = DPO + NAS + E$
	TMR	物质总需求	$TMR = DMI + HF + IF$	
	TMI	物质总投入	$TMI = DMI + HF$	$TMI = TMO + NAS$
	DTMR	国内物质总需求	$DTMR = TMR - I - HF$	
排出	E	出口		
	DPO	国内生产过程排放	$DPO = \text{各种污染物排放}^{\text{②}}$	
	TDO	国内总排放	$TDO = DPO + HF$	
	DMO	直接物质排出	$DMO = DPO + E$	
消耗	DMC	国内物质消耗	$DMC = DMI - E$	$DMC = NAS + DPO$
	TMC	总物质消耗	$TMC = TMR - E - \text{出口隐藏流}$	
平衡	NAS	存量净增长	$NAS = DMI - DPO - E$	$NAS = DMC - DPO$
	PTB	实物贸易平衡	$PTB = I - E$	

注：①国内原料包括：a，国内生物物质输入：农、林、牧、渔产量^[23]。b，国内非生物物质输入：化石燃料、金属和工业矿物产量；化石燃料燃烧、工业过程及生物呼吸消耗的 O₂量、土壤呼吸耗氧量；植物光和作用消耗的 CO₂量。c，国内水输入：供水量。②各种污染物包括：a，国内固体废弃物输出：工业和生活固体废弃物排放量。b，废气和其他气体输出：化石燃料燃烧和工业废气排放量、生物和土壤呼吸排放的 CO₂量、植物光和作用排放的 O₂量。c，国内废水输出：工业和生活废水排放量。③表 1 各类物质资源量的统计数据有 2 个来源，一是国内公开发行的各种统计年鉴，如《辽宁省年鉴》、《辽宁省统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《辉煌的岁月——辽宁 60 年回眸》、《中国经济统计年鉴》、《中国有色金属工业年鉴》等统计资料；另外，部分数据通过相关机构调研获得。二是物质平衡的计算结果。

估算系数为^[25]：猪，75kg/头；羊，20kg/只；牛，400kg/头；木材，975kg/m³；(2)化石燃料产量由煤、石油、天然气 3 部分产量构成；工业矿物产量仅考虑原盐、10 种有色金属、生铁、钢、钢材、水泥、平板玻璃。其中，平板玻璃重量按每重量箱 50kg 计算^[25]。(3)化石燃料燃烧耗氧量，本文以二氧

化碳和二氧化硫的排放量按氧在其分子量中的比例进行推算，即将化石燃料燃烧排放的二氧化碳量乘以 0.73 与二氧化硫排放量的 0.5 倍相加。(4)生物呼吸消耗的氧气量分为人和动物 2 类，后者主要指家畜如牛、马、猪和羊等。根据 Matthews 资料^[26]，每人每年呼气产生 0.3t 二氧化碳，吸进 0.25t 氧气；牲畜的呼吸系数如表 2。(5)土壤呼吸耗氧量主要按农田计算，每公顷农田年均耗氧量为 12.41 万 kg。(6)植物光合作用消耗的二氧化碳量近似

表 2 每头牲畜的呼吸系统

Tab 2 The respiratory system of each animal

牲畜	CO ₂ (t/年)	O ₂ (t/年)
牛	2.92	2.449
羊	0.237	0.199
马	2.190	1.836
猪	0.301	0.253
鸡	0.013	0.011
鸭	0.013	0.011
鹅	0.013	0.011

资料来源：文献 [11]。

地用农、林产品产量乘以 1.47 求得。(7) 由于水输入量和输出量在 19 年平均占到物质输入总量和的 80% 和物质输出总量的 88%，所以为了方便比较，水的输入和输出未单独计算，仅包含产品中的水分进入核算体系。(8) 进口物质资源数量只以质量为单位的主要原材料物质纳入统计范围，本文仅考虑煤、石油、天然气、钢材、化肥的进口量。

在计算物质输出过程中，需要说明的是：(1) 国内固体废物包括工业固体废物排放、生活垃圾与粪便排放、农药与化肥流失量、医疗垃圾排放量。将农药、化肥作为输出部分的组分是因为其很容易转化成污染物随水和空气的运动而流失到环境中去。其中，医疗废弃物重量 = 3.4 kg/日 · 床位 × 总病床数 × 占床率 (60%) × 365 日^[25]；化肥流失率为 25%。(2) 废气和其他气体主要由 3 部分组成，分别是工业废气排放总量 (包括工业二氧化硫、工业烟尘和工业粉尘)、二氧化碳 (主要由化石燃料燃烧及生物呼吸、土壤呼吸作用产生)、氧气 (来自于植物光合作用)。二氧化碳和氧气数据通过计算得来。其中化石燃料燃烧排放的二氧化碳量 $m(\text{CO}_2)$ (折合成碳)，采用下列公式计算^[24]：

$$m(\text{CO}_2) = \sum P_i F_i C_i \quad (1)$$

式中， P_i 是第 i 种化石燃料的消耗量，只考虑煤、石油和天然气 3 种化石燃料。 F_i 是第 i 种化石燃料的平均有效氧化系数，这里取煤、石油、天然气的平均有效氧化系数分别为 0.982、0.918 和 0.98。 C_i 是单位燃料中的含碳量，每 t 标准煤的平均含碳量为 0.85，每 t 标准煤的燃油含碳量为 0.707，每 t 标准煤的燃气含碳量为 0.403^[24]。(3) 生物呼吸中排放的二氧化碳量按表 2 计算而得。(4) 植物光合作用排放的氧气量，按 $n(\text{CO}_2)/n(\text{O}_2)$ 的比例为 1，由植物光合作用消耗的二氧化碳量推算。(5) 出口物质资源数量将以质量为单位的各种原材料物质纳入统计范围，本文仅考虑煤、石油、天然气、粮食和钢材的出口量。

本文所涉及物质的隐藏流均依据 Wuppertal 研究所在 1998 年估算的全球生态包袱平均比率加以估算^[25]，其中原油为 1:1.22，天然气为 1:1.66，另外，由于我国煤炭资源以硬煤为主，因此在计算煤炭隐流时取硬煤的生态包袱平均比例，为 1:1.236^[24]；建筑挖方量 = 当年建筑竣工面积 (m^2) × 3.2 (m) × 1.55 (t/m^3)。由于辽宁省历年水土流失量难以获得，故隐藏流中未包含水土流失量。

2.2 辽宁省经济—环境系统物质代谢分析

参照表 1 得出 1990~2008 年辽宁省物质流分析的全部分析账户体系，根据研究需要，本文仅对直接物质输入、生产过程排放、物质总需求 3 个账户进行详细分析。直接物质输入是指直接输入到经济系统中的物质流；生产过程排放是指经济系统运行所产生的各类排放至自然环境中的废弃物；物质总需求是指直接物质输入与隐藏流的和。

2.2.1 直接物质输入 (DMI)

辽宁省 DMI 总体呈增长趋势 (图 1)。研究期内辽宁省经济系统物质投入由 1990 年的 78619.6 万 t 增加到 2008 年的 179786.9 万 t，年均增长 4.45%，小于同期 GDP 年增长率 14.30%。其中国内原料投入在 19 年间总体上升，年均增长 2.09%，1992 年增长最快，为 18.19%；进口物质年均增长 15.84%；自 1998 年，辽宁省物质进口量有明显的大幅增长，主要是天然气和钢材进口量变动导致的，由于城市用气量的增长，及大连、阜新等城市的天然气储备设备的完善，相应增加了天然气资源的进口；而城市建设速度的增长导致了钢材进口量的明显增加。能源使用量增加在提高了经济发展水平和人民生活水平的同时，也反应了辽宁省的外向型经济逐渐增强。同样源于天

然气和钢材进口量波动减少，导致 19 年间辽宁省进口物质在 2006 年出现最大跌幅。国内原料中，根据统计内容，能源所占比重在研究期内由 44.23% 下降到 21.72% (图 2)，矿物与工业原料比重则由 28.02% 上升到 43.00%，而同期的生物质比重则由 17% 增长至 21.08%，说明辽宁省作为老工业基地，其工业发展占有绝对优势。

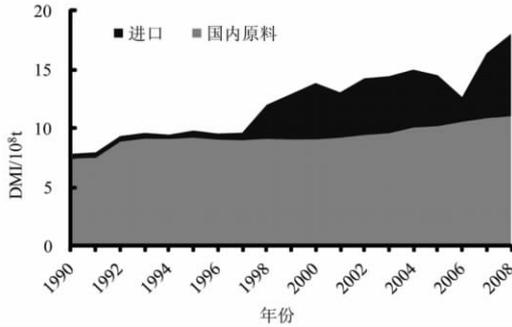


图 1 辽宁省直接物质输入组成及变化 (按来源)
Fig. 1 Compositions and changes of direct material input in Liaoning Province (by source)

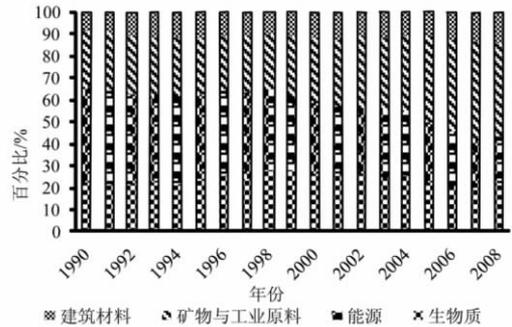


图 2 辽宁省直接物质投入主要组成及变化 (按类别)
Fig. 2 Compositions and changes of direct material input in Liaoning Province (by category)

2.2.2 生产过程排放 (DPO) 辽宁省 DPO 呈增长趋势，其各组成部分变化趋势如图 3 所示。研究期内辽宁省经济系统生产过程输出由 1990 年的 21023.64 万 t 增加到 2008 年 34368.49 万 t，年均增长 2.62%。各类排放物中，除水体和固体污染物的排放趋势有所减小外，气体污染物和耗散性废物^①的排放量 19 年处于稳步上升状态。其中，水体主要污染物在 1997~1998 年间变化较突出，主要是因为 COD 排放量由 36.5 万 t 增长至 73.95 万 t 导致的，这是工业发展的必然结果。辽宁省包含了诸如鞍山、抚顺、本溪等资源型城市，这些城市在对资源进行开采的同时，由于技术所限，资源浪费严重，资源开采的环境污染连带效应等极为突出。如鞍山、抚顺、本溪 3 个城市的工业废水排放总量、工业 SO₂ 排放量在 19 年平均占辽宁省 (共 14 个城市) 的 31%。所以，针对重化工业为主导的产业结构现状，辽宁省亟待实行提高资源开采效率、减少工业污染物排放量的经济增长方式。

2.2.3 物质总需求 (TMR) 辽宁省 TMR 呈不断增长趋势，其组成及变化如图 4 所示。19 年间，DMI 是辽宁省 TMR 的主要组成部分，其占 TMR 的比例平均达到 54%，但总体不断下降，年均下降 2%。进口隐藏流和国内隐藏流则分别占 TMR 的 15.68% 和 29.41%，二者均呈增长趋势，年均分别增长 21.49%、0.47%。说明，辽宁省经济发展与国外市场交流更加密切，进口的增加导致了进口隐藏流的急剧上升。但也应该注意到，隐藏流的增大，一定程度上反映了经济发展对自然资源的消耗和对生态环境冲击程度的增加。总体上，区域经济系统发展主要还是依靠区域内部的物质投入，其与区域外部的物质交换能够提高区域的经济发展水平，但是也相应增加了区域内部的环境压力。高效率的利用物质投入，减小废弃物排放是当务之急。

^①耗散性物质仅考虑化肥及农药的流失量，水体污染物指污水中的 COD 等有害物质，气体污染物指工业 SO₂、工业烟尘和工业粉尘的排放量。

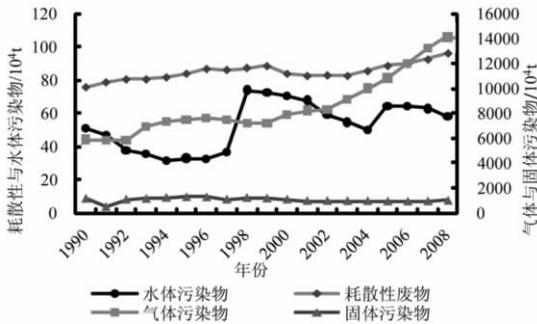


图3 辽宁省生产过程排放组成及变化

Fig. 3 Compositions and changes of domestic processed output in Liaoning Province

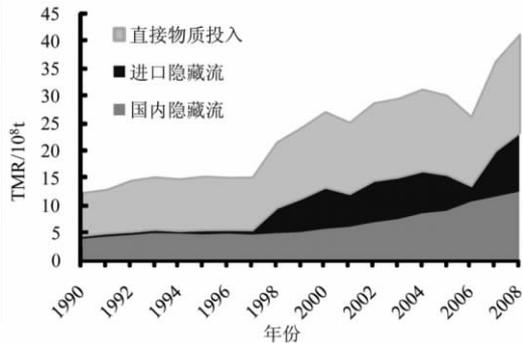


图4 辽宁省物质总需求组成及变化

Fig. 4 Compositions and changes of total material requirement in Liaoning Province

3 物质流利用效率分析

物质流利用效率是通过衡量经济—环境系统内物质投入和废物排放的关系，来判断系统内物质投入与产出的有效利用情况。数据包络分析（DEA）方法^[27]是一种评价具有相同类型投入和产出的若干决策单元（Decision Making Units, DMU）相对效率的一种有效方法^[28]，其通过构造目标函数，将分式规划问题转化为线性规划问题，通过最优化过程来确定权重，从而使对一组决策单元的评价更具客观性；并且，DEA 对决策单元的评价结果与各输入、输出数据的量纲无关^[4]。因此本文选择 DEA 方法，将物质流账户内的投入、产出看作是决策单元，通过分析物质投入生产效率和物质生产排放效率来确定辽宁省物质流利用效率。

3.1 模型构建

选择 DEA 方法中基于可变规模收益模式（Variable Returns to Scale, VRS）的 BCC 模型^[29]，其在运算过程中，以规模报酬变动为前提，将纯技术效率和规模效率区分开，允许技术效益的计算不受规模效益的影响，而综合效率值等于纯技术效率值与规模效率值的乘积。模型构建如下：

假设有 n 个 DMU，各 DMU _{k} ($k=1, 2, \dots, n$) 使用 m 种投入 X_{ik} ($i=1, 2, \dots, m$)，生产 s 种产出 Y_{rk} ($r=1, 2, \dots, s$)，则第 k 个 DMU 的相对效率值可由下面模型求得^[27]：

$$\text{Max} h_k = \sum_{r=1}^s u_r Y_{rk} - u_o \quad (2)$$

$$s. t. \frac{\sum_{r=1}^s u_r Y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i X_{ik}} \leq 1, k = 1, 2, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq \epsilon \geq 0, r = 1, 2, \dots, s, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

进行对偶变换，以减少限制式数目，如下所示：

$$\text{Min} h_k = \theta_k - \epsilon \left[\sum_{i=1}^m \Delta X_{ik}^- + \sum_{r=1}^s \Delta X_{rk}^+ \right] \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k X_{ik} - \theta_k X_{ik} + \Delta X_{rk}^- = 0 \tag{5}$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k Y_{rk} - \Delta X_{rk}^+ = Y_{rk} \tag{6}$$

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1 \tag{7}$$

$$\lambda_k, \Delta X_{rk}^-, \Delta X_{rk}^+ \geq 0, k = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, m, r = 1, 2, \dots, s$$

式中, ΔX_{rk}^- 为投入项的差额变量, ΔX_{rk}^+ 为产出项的差额变量, λ_k 为赋予各 DMU 的权重, θ_k 则代表评估 DMU 所有投入等比例减少的潜在程度。当 $h_k=1$ 时, 表示 DMU_k 具有全面技术效率; 当 $h_k < 1$ 时, 表示 DMU_k 不具有全面技术效率。

3.2 物质流利用效率评价

本文选用 DEAP2.1 软件作为实现 DEA 的有效工具, 以 GDP、DMI 和 DPO 作为评价指标, 分别对辽宁省物质流账户进行物质投入生产效率和物质生产排放效率的测度。

3.2.1 物质投入生产效率 物质投入生产效率通过区域物质投入 DMI 与经济产出 GDP 的合理性来衡量物质投入的有效性。以 DMI 作为投入项, 以 GDP 作为产出项, 选择 *input* (保持产出不变情况的投入最小化) 的 VRS 计算, 得出 DMI 技术效率和 DMI 规模效率 (图 5), 进而通过计算二者的乘积得到 DMI 综合效率, 即物质投入生产效率。19 年间, 辽宁 DMI 技术效率呈现波动上升趋势, 并于 2008 年达到相对最大效率值 1; 同期, 辽宁省 DMI 规模效率也呈现波动上升趋势, 在 1998 年接近于 1, 并于 2008 年最终达到最大规模效率值 1, 说明 19 年间辽宁省的经济增长大多伴随着在技术效率一定的基础上, 物质投入一直处于较大规模状态。从总体看, 1990~2008 年辽宁 DMI 综合效率并不高, 19 年间平均值仅为 0.5, 减少物质投入有极大的增长空间。

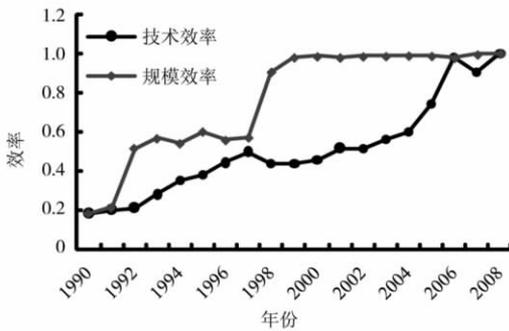


图 5 辽宁省物质投入生产技术效率及其规模效率
Fig. 5 Production efficiency and scale efficiency of direct material input in Liaoning Province

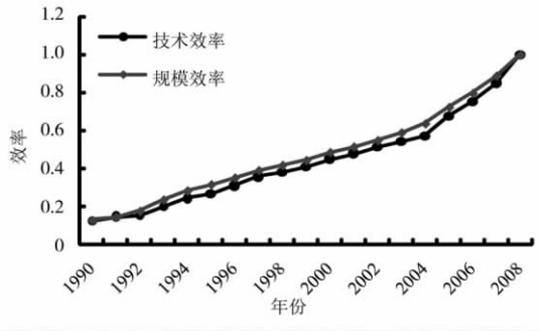


图 6 辽宁省生产过程排放技术效率及其规模效率
Fig. 6 Production efficiency and scale efficiency of domestic processed output in Liaoning Province

3.2.2 物质生产排放效率 物质生产排放效率通过区域经济产出 GDP 与区域物质生产排放 DPO 来衡量一定数量的生产排放是否达到较高数量的经济产出。以 DPO 为投入项, 以 GDP 为产出项, 选择 *output* (保持投入不变情况的产出最大化) 的 VRS 计算, 得出的 DPO 技术效率和 DPO 规模效率 (图 6), 进而得到 DPO 综合效率。DPO 技术效率与规

模效率两条曲线在 19 年间同时呈现平稳上升的态势，并同时在 2008 年达到最大效率值 1。期间，DPO 技术效率平均值小于其规模增长效率平均值 0.26，但是其技术效率年均增长率高出其规模效率年均增长率 0.17 个百分点。说明辽宁省单位 DPO 所产生 GDP 产出效率呈现增长态势，即从排放角度证明了区域资源利用效率的提高。辽宁省 DPO 综合效率平均值在 19 年间内仅为 0.45，远低于最大效率值 1，说明辽宁省经济发展对资源环境的破坏较为严重，废物排放效率较低、废物排放量较大，因此亟需对其物质减量化的实行效果和减量化的潜力进行评估。

4 物质减量化检验研究

4.1 基于 MFA 的物质减量化模型

物质减量化是从源头上减少输入经济系统的物质质量，以实现经济发展的可持续性^[6]。李名升认为物质减量化为单位经济产出生产过程中所消耗的物质材料或所产生的废弃物的绝对或相对减少^[26]。根据已有研究成果，可构建资源生产率 (RPE)、经济系统的资源消耗与 GDP 之间的关系^[25]：

$$RPE = GDP/DMI \quad (8)$$

经推演，并忽略二阶交叉项，可得：

$$\Delta GDP \approx DMI \times \Delta RPE + \Delta DMI \times RPE \quad (9)$$

$$\Delta DMI = \frac{\Delta GDP - DMI \times \Delta RPE}{RPE} = DMI \times \frac{\Delta GDP}{GDP} - DMI \times \frac{\Delta RPE}{RPE} \quad (10)$$

式中等号右侧第一项表达了由于经济增长所带来的反弹效应 (RBE)，第二项表达了提高资源生产率所带来的物质减量效应 (RDE)，两者的差值称为增长效应。要实现物质利用的绝对减量，就必须使得提高资源生产率所带来的物质减量效应大于经济增长所带来的反弹效应。

根据上述模型，减量效应表示由于技术进步（物质使用密度下降）而形成的直接物质输入绝对量的减少，同时定义第 t 年的物质减量指数为^[25]：

$$RSI_t = \frac{RDE_t}{DMI_{t-1} + RBE_t} \times 100\% \quad (11)$$

式中， RDE 为物质消耗的减量效应， RBE 为物质消耗的反弹效应。物质减量指数 RSI 可以表示直接物质投入相对量的减少。

同理，以 DPO 表示经济系统的废弃物排放，并定义 WPE 为废弃物产出效率 ($WPE = GDP/DPO$)，则可以求出废物排放的减量效应 (WDE)、反弹效应 (WBE) 及潜在废物减排指数 (WDI)^[25]：

$$WDI_t = \frac{WDE_t}{DPO_{t-1} + WPE_t} \times 100\% \quad (12)$$

4.2 辽宁省物质减量化的效应分析

反弹效应反映了由于 GDP 总量的增长对物质输入和输出增长的贡献。1990~2008 年间，辽宁省经济持续增长，因此其物质输入与输出的反弹效应均表现为正值，但是其反弹效应曲线的波动并无明显规律（图 7、图 8）。因为 DMI 与 GDP 均为正值，当反弹应为正值时，说明 ΔGDP 为正值，即经济没有倒退；但由于 ΔGDP 的波动较为明显，所以，反弹效应曲线的走势在很大程度上受到 ΔGDP 走势的影响。具体为，辽宁省 DMI 与 DPO

的反弹效应曲线在 1993 年之前，均表现出上升趋势，于 1993 年到达顶点后逐步走低，并于 1995 年之后趋于缓和；由于经济持续增长加强了对物质消耗与废物排放的正向驱动效果，并且随着经济增长绝对量的逐年增加，在物质代谢上表现为 *DMI* 与 *DPO* 的反弹效应于 2004 年之后均呈扩大趋势。由于反弹效应的提高主要表现为 *DMI* 的增加，具体表现为 19 年间 *DMI* 反弹效应的平均值高于 *DPO* 1.37 亿 t，反映了物质消耗量逐步增长，会带动相应废物排放量的增加。因此，未来辽宁省环境压力仍然严峻。

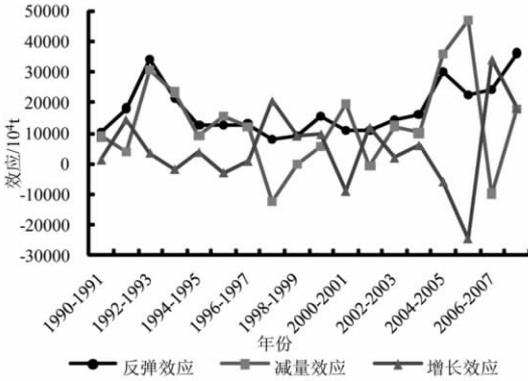


图 7 辽宁省直接物质输入减量效应分析
Fig. 7 Dematerialization effect analysis of direct material input in Liaoning Province

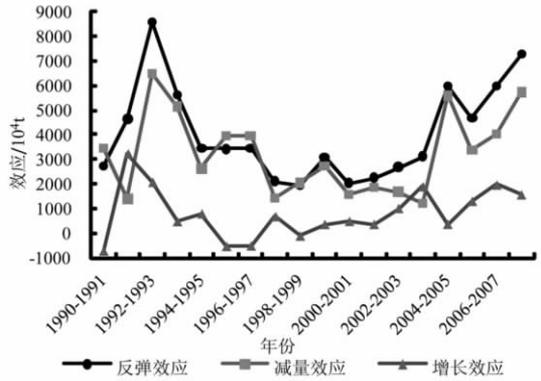


图 8 辽宁省生产过程排放减量效应分析
Fig. 8 Dematerialization effect analysis of domestic processed output in Liaoning Province

减量效应反映了由于资源生产效率的提高对抑制物质输入与输出的贡献^[30]。1990~2008 年，辽宁省 *DMI* 与 *DPO* 的减量效应处于波动增长趋势，但波动幅度大于反弹效应。这是因为减量效应主要受到由 *GDP* 与 *DMI* 共同作用的 *RPE* 影响，而 *RPE* 的年际增量变化又非常突出，因此导致了 *DMI* 与 *DPO* 的减量效应曲线的剧烈波动。研究期内，*DMI* 减量效应在 1998 年、1999 年、2002 年、2007 年这 4 个年份出现了明显倒退，加剧了相应年份的物质消耗；而 *DPO* 减量效应在期内无明显倒退，即资源生产效率的提高没有加剧废物排放。在其余年份效率的提高对抑制经济系统物质输入与输出具有积极作用。

增长效应即通过反弹效应与减量效应的差值出现负数的情况，来判断区域物质减量化的实现效果。1990~2008 年间，辽宁省 *DMI* 分别在 1994 年、1996 年、2001 年、2005 年、2006 年出现 5 次直接物质投入的绝对减量结果，*DPO* 分别在 1991 年、1996 年、1997 年出现 3 次物质生产排放的绝对减量结果。

4.3 辽宁省物质减量化检验

1990~2008 年，辽宁省共减少物质使用 22.88 亿 t、减少废物排放 5.82 亿 t，分别占同期 *DMI* 和 *DPO* 的 9.94% 和 11.39%。物质减量化效果相对比较理想，但仍具有较大减量化潜力。根据以上计算结果进一步得到物质减量指数和废物减排指数，两者的变化幅度较大，分别在 -11.89%~28.06% 和 3.91%~20.23% 之间波动，变异系数都小于 0.1，说明物质投入及废物输出相对量的减少在各年间存在较大差异，减量化成效波动较大。因此对 2 个变量序列中长期变动趋势和短期波动成分加以分离，以便进一步说明辽宁省经济发展中物质减量指数和废物减排指数变化的潜在趋势。H-P 滤波是经常使用的经济变量

趋势分解方法。

设 Y_t 是包含趋势成分 (S_t) 和周期成分 (C_t) 的物质减量指数时间序列, 则有^[31]:

$$Y_t = S_t + C_t \tag{13}$$

利用 H-P 滤波可得到物质减量指数的趋势成分 (S_t , 即潜在物质减量指数), 进一步的定义物质减量缺口如下:

$$MDG_t = (Y_t - S_t) \times (DMI_{t-1} + MBE_t) \tag{14}$$

物质减量缺口为实际物质减量效应与潜在物质减量效应之间的差额, 其可反映经济发展中物质消耗减量化效果周期波动的变化轨迹, 也可反映现有物质减量化潜力的实现程度。若 MDG 大于 0, 表明实际物质减量指数大于潜在减量指数, 经济发展中的物质投入控制强度较大, 物质减量化效果明显, 物质减量化潜力得以充分发挥, 经济增长表现为低物质投入型; 反之亦然。同理可以得到潜在废物减排指数和废物减排缺口 (WDG)。 WDG 的意义与 MDG 类似。

1990~2008 年辽宁省潜在废物减排指数高于潜在物质减量指数, 平均高出 1.46 个百分点 (图 9、图 10), 二者变化趋势基本一致, 相关系数高达 0.89, 反映了经济增长对物质排放的线性相关关系。潜在废物减排指数高于潜在物质减量指数曲线均于 2001 年前后出现了由下降到上升的变化, 是由于这一时期, 东北地区经济发展速度有所降低; 而且, 辽宁省在 1998 年之后积极开展了工业污染源达标排放等工作, 实现了工业污染防治由单纯末端治理向全过程控制的转变, 并积极开展工业废弃物的合理回收利用, 使得区域生产排放有所减少。但是, 2003 年东北地区振兴战略实施以来, 有效地带动了辽宁省经济发展, 在物质投入增多的情况下, 减排量有所增加, 相应地, 潜在减排指数曲线也呈升高趋势。潜在废物减排指数高于潜在物质减量指数, 一方面反映出辽宁省在物质减排方面取得了一定成绩, 但也折射出由于 DMI 的持续增长, 还将会导致废弃物的进一步过度排放。

1990~2008 年间, 辽宁省物质减量化和废物减排取得一定效果。辽宁物质减量缺口大于 0 的年份有 8 年, 废物排放缺口大于 0 的年份有 9 年, 且 19 年年内物质减量化总缺口与废物减排总缺口均大于 0, 分别为 137.9 亿 t 和 13.14 亿 t, 分别高于潜在物质减量化

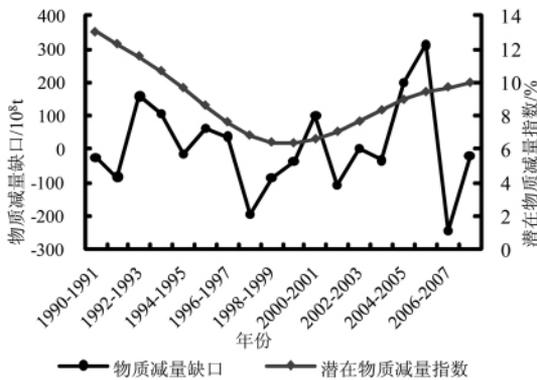


图 9 辽宁省直接物质投入减量缺口与潜在减量指数
Fig. 9 Dematerialization gap and underlying dematerialization index of direct material input in Liaoning Province

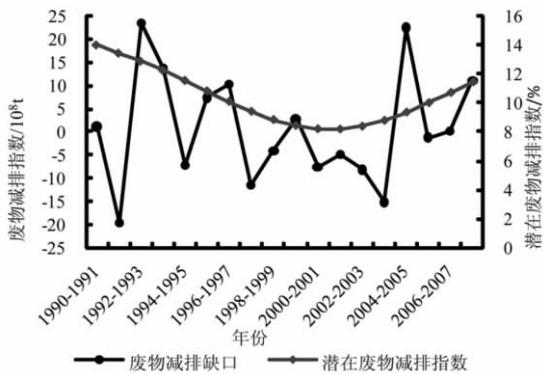


图 10 辽宁省生产过程排放减量缺口与潜在减量指数
Fig. 10 Dematerialization gap and underlying dematerialization index of domestic processed output in Liaoning Province

量和潜在废物减排量 4.03 倍和 0.25 倍。虽然多数年份经济增长表现为高物质投入、高污染型,但物质输入减量化和废物减排的潜力得到比较充分的释放,说明辽宁省物质减量化和废物减排潜力得到一定程度实现,但与理想状态还有较大差距。辽宁省未来还应积极降低物质输入、加大废物减排力度,以达到资源高效利用和降低环境污染的目的。

5 结论与建议

本文利用物质流账户对辽宁省的物质投入与产出进行了研究,并根据物质投入与产出效率,检验了物质减量化的效果。主要结论如下:

(1) 1990~2008 年间,辽宁省直接物质投入、生产过程排放、物质总需求均呈增长趋势。直接物质投入增长小于同期 GDP 年均增长率,其中进口物质增长速度超过国内原料增长速度;国内原料中,矿物与工业原料比例上升凸显辽宁省资源型产业结构特征。生产过程排放的增加,预示着经济发展的物质减排压力不断增加。物质总需求中,直接物质投入是主要组成部分,进口隐藏流的快速增长反映了经济发展对自然资源的消耗以及对生态环境冲击程度的加大。

(2) 1990~2008 年间,辽宁省物质投入与物质排放的综合效率总体不高。其中,直接物质投入的技术效率波动上升,规模效率保持稳定,但综合效率 19 年间平均值仅为 0.5,说明辽宁省经济发展在物质最大投入的情况下,伴随着经济产出的较低综合效率状态。生产过程排放的技术效率与规模效率都呈直线上升趋势,即从排放角度证明了辽宁省区域资源利用率的提高,但是生产过程排放整体综合效率不高。

(3) 经过分析,得出 1990~2008 年间辽宁省物质减量化发展的 4 个主要结论:①直接物质投入与生产过程排放的反弹效应均为正值,预示辽宁省未来经济发展将伴随着直接物质投入的持续增加和环境压力的持续增长。②直接物质投入与生产过程排放的减量效应呈波动增长趋势,其中,直接物质投入减量效应在 1998 年、1999 年、2002 年、2007 年这 4 个年份出现明显倒退,加剧了相应年份的物质消耗。③潜在废物减排指数高于潜在物质减量指数,反映出因为经济增长而导致的直接物质投入的增长将加剧废弃物的排放。④物质减量化总缺口与废物减排总缺口分别为 137.9 亿 t 和 13.14 亿 t,分别高于潜在物质减量化量和潜在废物减排量,说明辽宁省物质减量化和废物减排潜力得到一定程度实现,但是减排压力依然存在。

(4) 作为重工业突出的资源型主导省份,辽宁省的物质减量化发展总体比较乐观。在直接物质投入和生产过程排放的减量效应相对全国比较高的情况下,实现了物质减量化的排放,且减排幅度较大^[25]。但是,辽宁省环保政策以污染物控制为主,而且在资源流通领域由于以市场调节为主,政府干预较少,资源利用存在严重浪费,将最终导致过度废弃物的排放;另外,辽宁省的经济、产业结构决定了其对资源的消耗与对环境的破坏,其物质利用的低效率化状况难以在短期内迅速改变。

(5) 为提高物质利用效率,辽宁省应该在如下几方面加以改善:①加强政府宏观指导,组织编制资源综合利用专项规划,完善资源综合利用政策。②因地制宜地提高资源利用效率,扩大再生能源的利用范围。③继续实施清洁生产,建立循环经济型企业,努力实现废物减量化、资源化、无害化^[32]。④发展生态工业,实现经济与环境“双赢”;发挥产业关联效应,在冶金、石化、煤炭、电力行业构建循环经济发展产业链条,形成规模效应等。

参考文献:

- [1] 张音波, 夏志新, 陈新庚, 等. 基于物质流分析方法的区域可持续发展动态研究. 资源科学, 2007, 29(6): 212~218.
- [2] 黄松林, 吴健生, 彭建, 等. 基于 MFA 的深圳市生态可持续评价. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1107~1114.
- [3] 夏传勇. 经济系统物质流分析研究述评. 自然资源学报, 2005, 20(3): 415~421.
- [4] 李丁, 汪云林, 付允, 等. 基于物质流核算的数据包络分析. 资源科学, 2007, 29(6): 176~181.
- [5] 张玲, 袁增伟, 毕军. 物质流分析方法及其研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6189~6198.
- [6] 张思锋, 雷娟. 基于 MFA 方法的陕西省物质减量化分析. 资源科学, 2006, 28(4): 145~150.
- [7] Ayres R U, Kneese A V. Production, consumption & externalities. American Economic Review, 1969, 59(3): 282~297.
- [8] 黄和平, 毕军, 张炳, 等. 物质流分析研究述评. 生态学报, 2007, 27(1): 368~379.
- [9] Weisz H, Krausmann F, Eisenmenger N, *et al.* Economy-wide Material Flow Accounting "A compilation guide". Luxembourg: Eurostat and the European Commission, 2007. 15~18.
- [10] Agency J E. Quality of the Environment in Japan. Tokyo: Japanese Environment Agency, 1992. 59~85.
- [11] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹: 可持续发展的重量及面积观念. 北京: 经济科学出版社, 2003. 32~62.
- [12] 王军, 周燕, 刘金华, 等. 物质流分析方法的理论及其应用研究. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(4): 60~64.
- [13] 徐鹤, 李君, 王絮絮. 国外物质流分析研究进展. 再生资源与循环经济, 2010, 3(2): 29~34.
- [14] 陈效迷, 赵婷婷, 郭玉泉, 等. 中国经济系统的物质输入与输出分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2003, 39(4): 538~547.
- [15] 徐明, 张天柱. 中国经济系统的物质投入分析. 中国环境科学, 2005, 25(3): 324~328.
- [16] 王亚菲, 余玥. 中国经济系统物质减量化与经济增长的关联分析. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(7): 112~119.
- [17] 刘伟, 鞠美庭, 于敬磊, 等. 天津市经济—环境系统的物质流分析. 城市环境与城市生态, 2006, 19(6): 8~11.
- [18] 徐一剑, 张天柱, 石磊, 等. 贵阳市物质流分析. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(12): 28~31.
- [19] 刘滨, 向辉, 王苏亮. 以物质流分析方法为基础核算我国循环经济主要指标. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(4): 65~68.
- [20] 张学毅, 王建敏. 基于物质流分析方法的低碳经济指标体系研究. 学习月刊, 2010, (4): 109~110.
- [21] 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): 2474~2480.
- [22] 柳楷玲, 段宁, 武春友. 1990~2005 年中国经济系统物质投入及其减量化分析. 技术经济, 2009, 28(4): 71~75.
- [23] 黄和平, 毕军, 李祥妹, 等. 区域生态经济系统的物质输入与输出分析——以常州市武进区为例. 生态学报, 2006, 26(8): 2578~2586.
- [24] 姚星期. 基于物质流核算的浙江省循环经济研究. 北京: 北京林业大学博士学位论文, 2009. 73~90.
- [25] Li M S, Zhang H M, Li Z, *et al.* Economy-wide material input/output and dematerialization analysis of Jilin Province(China). Environ Monitoring Assessment, 2010, 165: 263~274.
- [26] 李名升. 吉林省经济—环境系统时空格局与协调发展研究. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所博士学位论文, 2009. 91~105.
- [27] 魏权龄. 数据包络分析. 科学通报, 2000, 45(17): 1793~1808.
- [28] 严亚丹, 过秀成, 叶茂. 基于 BCC 模型的常规公交线路绩效评估方法. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(4): 143~147.
- [29] Banker R D, Charnes A, Cooper W W. Some models of estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. Management Science, 1984, 9(9): 1078~1092.
- [30] 张仲. 欧盟资源消耗与经济发展关系的研究——基于经济系统的物质流分析. 上海: 复旦大学硕士学位论文, 2008. 27~35.
- [31] 董琨, 原毅军. 中国产业结构演变与经济波动关系研究. 大连理工大学学报: 社会科学版, 2007, 28(2): 9~12.
- [32] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. 地理研究, 2003, 22(2): 211~220.

Study on material dematerialization test of Liaoning Province based on MFA and DEA models

HAN Rui-ling^{1,2}, TONG Lian-jun¹, TONG Wei-ming³

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130012, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Material flow analysis (MFA) can quantify the relationships of material movement to resource utilization and to environmental effect in economic system by tracing the processes of input, storage and output of some substance in economic-environmental system, and it also can offer scientific basis for optimal management of resource and environment. This paper chose Liaoning Province, a representative of old industrial bases, as the research object. Firstly, by analyzing the indicators of material flow analysis, the paper determined the trends of Direct Material Input (DMI), Domestic Processed Output (DPO) and Total Material Requirement (TMR) between 1990 and 2008. Secondly, the Data Envelopment Analysis method (DEA) was used to measure the main indicators' efficiencies of material flow account respectively and the urgent tasks to dematerialize in Liaoning Province were clarified. Finally, research of testing the developing process of dematerialization in Liaoning Province was made. Some conclusions can be drawn as follows. (1) There was a dematerializing trend during the economic development, but the damage of DMI to environment was distinct. (2) The general efficiencies of DMI and DPO showed an upgrading performance while their average efficiencies were still low, which meant the DMI was saturated and the environment was destroyed with economic development. (3) The rebound effect of dematerialization was increasing as DMI was expanding and environmental stress was intensified. Fluctuations of dematerialization effect influenced the DMI and DPO of the corresponding years. (4) In 1990-2008, Liaoning Province reduced 22.88 million tons of DMI, and 5.82 million tons of DPO. Potential input dematerialization index was higher than potential waste dematerialization index, reflecting the rise of DMI would increase wastewater discharge. The dematerialization gaps of material input and waste were both greater than 0, which implied the potential of input dematerialization and waste dematerialization had been fulfilled to some degree, but more efforts should be done.

Key words: MFA; DEA; material use efficiency; material dematerialization; Liaoning Province