

引用格式:夏艳清,李书音. 基于物质流分析的区域经济系统环境效率评价[J]. 资源科学, 2017, 39(9): 1670-1681. [Xia Y Q, Li S Y. Environmental efficiency evaluation of regional economic systems based on material flow analysis[J]. *Resources Science*, 2017, 39(9): 1670-1681.] DOI: 10.18402/resci.2017.09.06

# 基于物质流分析的区域经济系统环境效率评价

夏艳清<sup>1,2</sup>, 李书音<sup>1,2</sup>

(1. 东北财经大学经济学院, 大连 116025; 2. 东北财经大学经济计量分析与预测研究中心, 大连 116025)

**摘要:**为了对中国31省市自治区经济系统的物质利用效率,以及污染物排放与经济发展的关系进行研究,本文利用物质流分析方法和环境库兹涅茨曲线计量模型,研究了中国1995-2014年31省市自治区的物质流动状况,并将之同各研究区的经济发展指标相结合,对各地区物质流动与经济增长之间的脱钩关系进行考察,对各省市区生态压力指标的环境库兹涅茨曲线存在性进行检验。结果表明:研究期内,各省市区物质输入量与输出量不断增加,物质消耗效率的提升状况要明显优于废弃物排放的减少。在多数情况下,经济增长同物质投入或废弃物排放实现了相对“脱钩”,部分地区生态压力指标的环境库兹涅茨曲线存在。总的来说,各省市区并没有转变已有的线性物质流动模式。

**关键词:**环境库兹涅茨曲线, 环境生态效率评价, 可持续发展, 物质流分析

DOI: 10.18402/resci.2017.09.06

## 1 引言

物质流分析方法源于代谢理论和投入产出分析<sup>[1]</sup>,从实物质量出发,通过使用经济系统的物质输入、输出与贮存等物质流分析指标,定量分析人类社会的经济系统与自然环境之间的物质交换<sup>[2]</sup>,是定量测度经济系统运行中物质使用量的基本工具<sup>[3]</sup>。目前,国内外的区域物质流研究多数以“欧盟导则”<sup>[4,5]</sup>为基础,并根据研究区的实际情况作出调整,从而建立相应的科学评价指标体系,以期对研究区的环境生态效率做出评价并提出优化建议<sup>[6-11]</sup>。

目前,国外物质流分析的相关研究主要基于国家尺度上的经济系统展开,众多的西方国家完成了国家层面上的物质流分析<sup>[4-7]</sup>。相对于西方较为成熟的物质流核算体系,中国有关物质流分析在环境领域的应用起步较晚,且大多数研究为单个区域层面上的核算<sup>[8-12]</sup>,其中的物质输入输出核算只考虑国际贸易中的物质流动。综合全面考察中国各地区的物质流分析,并将其结果进行比较的研究很少见。

本文将物质流分析方法系统地应用于中国31

省市自治区,以期对各地区经济发展的环境生态效率做出评价。其结果将有助于从物质输入和输出端对各地区的物质利用效率和废弃物排放状况做出比较,为相关部门的政策制定和实施提供参考。

## 2 区域物质流分析方法

### 2.1 分析框架

物质流分析的基本观点是:人类活动所产生的环境影响在很大程度上取决于进入经济系统的自然资源、成品及半成品的数量与质量,以及从经济系统排入环境的废弃物的数量与质量。前者产生对环境的扰动,引起资源的耗竭和自然生态的退化;后者则产生环境污染,导致人类生存环境的恶化<sup>[12]</sup>。物质流分析基于质量守恒定律,将经过经济系统的物质区分为输入、贮存、输出三部分。通过研究这三者之间的关系,跟踪、定位物质利用及迁移、转化的途径<sup>[13]</sup>。图1即为区域经济系统物质流分析的研究框架。

从图1中可知,物质流分析研究社会经济系统与生态环境系统之间的物质交换。人类将从本区

收稿日期:2017-02-07; 修订日期:2017-06-15

基金项目:国家社科基金一般项目(14BJL089);国家自然科学基金项目(71603042)。

作者简介:夏艳清,女,辽宁本溪人,博士,副教授,主要研究方向为数量经济学和生态环境经济学。E-mail: jinglexyq@163.com

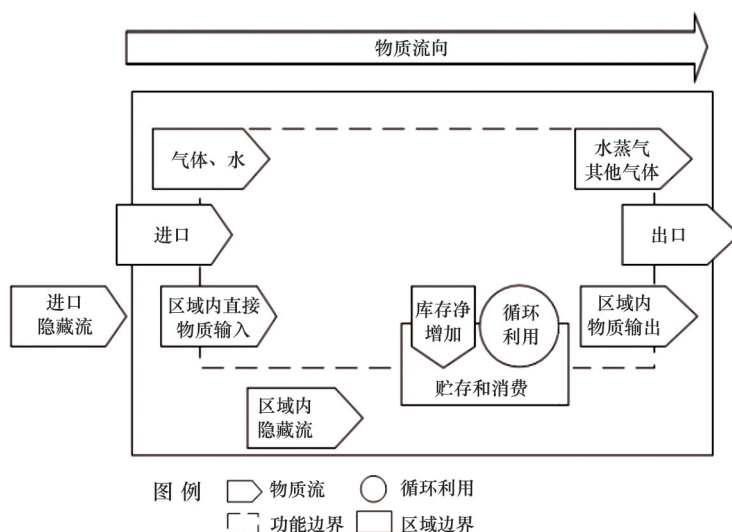


图1 物质流分析框架

Figure 1 Material flow analysis framework

域环境系统中开采的自然物质以及从其他区域中进口的物质输入到本区域经济系统中,其中开采的自然物质和进口的初级产品、中间产品在经济系统中经过加工和转化,得到的经济产品和进口的最终产品或是被本区域直接消费、贮存或是被出口到其他区域,在这一过程中产生的废弃物或是循环再利用,或是直接排放到自然环境中去。区域经济系统正是通过物质输入、贮存和输出完成整个物质流动过程。

在物质的输入端,进入到经济系统的物质分为直接物质输入和隐藏流两部分,二者构成区域物质需求总量。其中直接物质投入指的是直接进入到经济系统的自然物质,主要包括:①化石燃料;②矿物质;③生物物质;④水。隐藏流又称作生态包袱,是指人类为从自然界获得物质而必须动用的其他环境物质。主要包括:①开采化石能源、工业原材料时移动的表土量以及水土流失量;②生物物质收获时未使用的部分;③建筑遗弃土方以及河流疏浚;④自然环境水土流失量<sup>[14]</sup>。通常情况下,隐藏流的数量无法通过测量得到,一般在应用中依靠物质的隐藏流系数估算得到。

经济系统的物质输出主要包括两部分,即区域内总输出以及出口,二者构成区域物质总输出。其中区域内总输出是指在生产前、生产过程中以及产品使用过程中排放到自然环境的物质。主要包括:

①污染物排放;②耗散性产品的使用以及原材料的耗散性损失。出口物质包括原材料、半成品、成品以及出口产品附带的包装等。

## 2.2 系统边界

物质流分析从时间和空间两个维度定义系统边界<sup>[15]</sup>。时间上的边界取决于被考察的系统种类以及待研究的问题。空间上的边界一般采用相应的行政边界。区域物质流分析需要对空间边界做出以下三方面定义:①本区域内经济系统与自然环境的边界,即功能边界;②区域内经济系统与国内其他经济系统之间的输入与输出边界;③区域内经济系统与其他国家或地区经济系统之间的输入与输出边界<sup>[16]</sup>。

本文的研究目的在于通过物质流分析对中国各省市自治区1995-2014年的物质输入输出状况和环境-经济关系进行横向、纵向的分析和比较。根据这一研究目的和区域边界的定义,本文中空间边界为各省市自治区的行政边界,相应的功能边界为各地区的经济系统和环境系统之间的边界,时间边界为1995-2014年。

## 2.3 分析指标及其计算公式

对经济系统进行物质流核算和分析,需要构建物质流分析的指标体系,从而有效的反映系统的运行效率,经济发展对自然资源的依赖程度,以及经济发展的环境代价。这一指标体系主要包括物质

输入指标、物质输出指标、物质消耗指标、效率评价指标、综合指标五类。具体的分析指标及计算公式参见表1。

2.4 数据来源及处理

中国31省市自治区的区域物质流分析在输入端主要考虑以下7项:

(1)化石燃料。包括原油、原煤、天然气和水电、风电在内的一次能源。数据来自1995-2014年各省市自治区统计年鉴及《中国能源统计年鉴》<sup>[17]</sup>。将汽油、柴油等二次能源视为一次能源经加工转换得到的工业产品,为避免重复计算,其投入数量不计入到化石燃料的统计中。但从省外调入到本省的二次能源计入到物质输入端的进口部分。

(2)矿物质。由于国家公布的数据中不包括铁矿石、有色金属矿石、盐矿、沙石等矿物质的直接开采量,本文借鉴已有研究对这一问题的处理办法,采取相应的替代变量以得到矿物质投入量的估计值。具体方法如下,建筑矿材用相应投入的水泥使用量替代,工业矿物使用原盐替代,金属矿物使用生铁以及各省使用的有色金属产品质量来替代,并通过将生铁产量乘以3.5的方法估算相应的铁矿石开采量<sup>[18]</sup>。数据来自研究期内历年各省市自治区统计年鉴以及《中国工业经济统计年鉴》<sup>[19]</sup>。

(3)生物物质。包括粮食、油料、水果、棉花、蔬菜、糖类、木材、水产品产量以及畜牧业的饲草、饲料消耗量。其中木材使用量用木材采运量作为替代,且原单位为立方米,使用 $1.2\text{m}^3=1\text{t}$ 的转换比例将其转换为相应的质量单位。水产品产量包括海

洋捕获量、淡水捕获量以及其他(水生哺乳动物和其他)三项。畜牧业饲草、饲料量使用估计的方法得到:饲草量按照国际规定,每头牛每天消耗饲草12kg估算<sup>[20]</sup>,其余牲畜的消耗量按相应饲草消耗比例估算得到<sup>[21]</sup>,饲草消耗比例系数参见鲍智弥<sup>[22]</sup>。饲料量按照 $1\text{t肉}=0.657\text{t}$ ,  $1\text{t水产品}=0.269\text{t}$ 估算得到。数据来自历年各省市自治区统计年鉴以及中国国家统计局网站(<http://stats.gov.cn>)。

(4)水。水的输入量按照用水总量计算,相关数据来自历年各省市自治区统计年鉴。水在区域物质需求总量中占据90%以上,因而削弱了其他输入物质的重要程度,对测算和分析结果产生影响。因而在本文中采用“欧盟导则”标准将水从物质需求总量中排除,作为单独一项进行处理。

(5)进口物质。指区域进口物质,不同于传统的对外贸易,还包含国内各省市自治区之间的贸易部分。由于各省市自治区统计数据的统计标准之间存在差异,以及受到各省市自治区本身在进口数据上不完整的限制,在进口部分,本文主要考虑了能源的进口,数据来自于历年各省市自治区统计年鉴以及《中国能源统计年鉴》<sup>[17]</sup>。其他物质进口数据来自于历年各省市自治区统计年鉴。

(6)平衡项,即空气输入。这一数据无法从统计年鉴上直接获得,需要相应的估计来得到。工业生产过程中的氧气输入量按照本研究区二氧化硫排放量乘以0.5估算。生物呼吸的耗氧量可以通过不同种类生物呼吸系数与其数量的乘积得到,其中呼吸系数参见姜俞<sup>[23]</sup>。植物光合作用消耗的氧气以

表1 物质流分析指标及其计算公式

Table 1 Material flow analysis indexes and calculation formulas

指标名称	计算公式
物质输入指标	(1)直接物质投入(DMI)=区域内物质开采+进口 (2)物质总投入(TMI)=直接物质投入+区域内隐藏流 (3)物质需求总量(TMR)=物质总投入+进口隐藏流
物质输出指标	(1)区域内生产过程排放(DPO)=废物排放(Waste)+产品生产和使用过程中的耗散性损失 (2)区域内总输出(TDO)=区域内生产过程排放+区域内隐藏流 (3)物质总输出(TMO)=区域内总输出+出口
物质消耗指标	(1)区域内物质消耗量(DMC)=直接物质投入-出口
效率评价指标	(1)物质生产力(MP)=GDP/物质需求总量 (2)物质排放强度(WI)=废物排放/GDP
综合指标	(1)弹性系数(EC)=物质消耗增长速度或废物排放增长速度÷经济增长速度



2017年9月

及二氧化碳的排放本文不予考虑。

(7)隐藏流。化石燃料、矿物质、生物质等隐藏流系数参见毕军等<sup>[16]</sup>,水泥的隐藏流系数参见陈效速和乔立佳<sup>[24]</sup>。半成品和成品的隐藏流采用日本的估计方法,即按照每吨物质含有隐藏流4t估算。

本文在物质流分析的输出端主要考虑以下4项:

(1)废物排放,是指经济系统的生产生活过程中产生的废水、废气以及固体废弃物。废气主要包括二氧化硫、烟尘、粉尘排放量,废水为工业废水和生活污水排放量的总和,固体废弃物包括城市生活垃圾和工业活动所产生的固体废弃物,其中城市生活所产生的固体废弃物由城市垃圾清运量来替代,工业活动的固体废弃物用工业固体废弃物产生量来替代。数据来自于中经网统计数据库(<http://db.cei.gov.cn>)和中国国家统计局网站(<http://stats.gov.cn>)。

(2)耗散性物质,即产品的耗散性使用及原料的耗散性损失,主要包括农业上的耗散性使用、道路的耗散性使用、化学品事故、有害气体泄露、基础设施腐蚀、风化等。本文主要考虑化肥、农膜和农药的流失量,其替代变量为:农用化肥使用量(折纯量)、农用塑料使用量、农药使用量。数据来源于中国国家统计局网站。

(3)出口物质,包括国际贸易和国内贸易中对外出口两部分,其中每部分可以具体分为原材料、半成品、成品、出口产品附带的包装。在本文中主要考虑各省市自治区能源的出口,数据来自于历年各省市自治区统计年鉴及《中国能源统计年鉴》<sup>[17]</sup>。

(4)出口隐藏流,计算方法与物质输入端的隐藏流计算方法相同。

## 2.5 环境库兹涅茨曲线计量模型

环境经济学中常用环境库兹涅茨曲线描述经济增长同环境水平之间的倒“U”型关系。随着对EKC理论的深入研究,现在常用的EKC曲线模型设定为:

$$\ln y = \alpha + \beta_1 \ln x + \beta_2 (\ln x)^2 + \beta_3 (\ln x)^3 + \mu \quad (1)$$

式中  $\ln y$  为生态环境水平指标的对数;  $\ln x$  为人均GDP的对数。在模型中:

若  $\beta_1 > 0, \beta_2 = 0, \beta_3 = 0$ , EKC曲线为直线上升。

若  $\beta_1 < 0, \beta_2 = 0, \beta_3 = 0$ , ECK曲线为直线下降;

若  $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \beta_3 = 0$ , EKC曲线为倒“U”型;

若  $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0, \beta_3 = 0$ , EKC曲线为“U”型;

若  $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \beta_3 > 0$ , EKC曲线为“N”型;

若  $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0, \beta_3 < 0$ , EKC曲线为倒“N”型。

## 3 区域物质流核算结果

### 3.1 物质输入规模结构分析

#### 3.1.1 物质输入规模

从输入经济系统的物质规模看,广东省的物质需求总量20年间一直保持最高,1995年为51.03亿t,2014年约为176.08亿t,平均年复合增长率为6.39%。1995-2004年间海南的物质需求总量最少,1995年为1.19亿t,2014年为4.86亿t。2004年后西藏成为物质需求总量最小的省份,其2014年的物质需求总量为3.28亿t。1995年,除安徽、山西、陕西、广东外,其他省市自治区的物质需求总量位于10到20亿t之间。2014年,除四川和广东省外,其他各地区的物质需求总量在40亿t-80亿t之间变动。

#### 3.1.2 物质输入变化趋势

从物质输入的变化趋势看,中国31省市自治区在1995-2014年的物质需求总量整体上呈现出上升趋势,这种趋势与各地区生产总值的增长趋势相一致,各省市自治区生产总量在20年间平均增长12.34倍,物质需求总量平均增长3.89倍。其中内蒙古自治区的生产总值增长最多,2014年其生产总值是1995年的21.18倍,相对应的物质需求总量为10.31倍;海南生产总值增长最少,2014年其生产总值约为1995年的9.22倍,相对应的物质需求总量增长了4.06倍。31省市自治区的物质需求总量增长趋势可以分为三种情况。

(1)物质需求总量增长态势分为平缓上升-快速上升-稳定发展三个阶段,包括北京、山西、内蒙古、吉林、辽宁、黑龙江、江西、山东、河南、湖南、海南及宁夏12个行政区域。平缓上升阶段为1995-1999年,物质需求总量增加不到一倍,平均4年增长1.42%。快速上升阶段为2000-2010年,12个省市自治区2010年物质需求总量相比于2000年平均增长2.88倍,其中增长最快的内蒙古增加6.66倍,增长速度最慢的湖南省增加1.49倍,同时在这10年间,中国的GDP也实现了快速增长,增长速度保持在

8%以上。稳定发展阶段是2011-2014年,这可能受到了经济增速放缓的影响,随着中国逐渐进入到“新常态”,各行业不断进行升级调整,高能耗、高污染的产业得到严格控制,因而物质需求总量增速放缓。平均来看,物质需求总量每年只增加微弱的0.19%,甚至部分地区的物质需求总量呈现出下降趋势。

(2)物质需求总量发展趋势只有平稳上升和急剧上升两个阶段,包括天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、湖北、广东、广西、四川、贵州、西藏、新疆、青海及云南15个地区。平稳上升阶段也是1995-1999年,15个地区的物质需求总量平均增长1.08倍。急剧上升阶段是2000-2014年,平均年增长速度为12.9%,几乎与地区生产总值增速一致。呈现这种情况的省市自治区多为中国东部地区及几个近年来发展较快的西部地区,虽然从中国总体来看经济增速相对放缓,但这些地区的经济增长依旧保持着相对较高的水平,因而经济发展需要的物质投入总量增速并没有减缓。

(3)物质需求总量发展趋势呈现总体上升,但是在部分年份有较大的波动,包括安徽、甘肃、陕西和重庆。这主要是由于组成物质需求总量中的隐藏流出现波动所致。

### 3.1.3 物质输入结构

从输入经济系统的物质构成来看,隐藏流总量约占各省市自治区物质需求总量的80%,这表明为开采经济系统所需要的有用物质,采掘过程的非使用开挖量对生态环境产生了巨大的压力,如何减少物质开采过程所产生的隐藏流总量,已成为改善生态环境所必须解决的问题。进口隐藏流占隐藏流总量的比例受到各省市输入物质对进口品依赖程度的影响。除安徽和内蒙古外,各地区进口隐藏流占隐藏流总量的比重呈现出上升的趋势,这表明各地区对进口的依赖在不断增强,虽然进口隐藏流不会对本区域的生态环境产生危害,但从中国整体的范围来看,这种进口对环境的危害程度取决于进口品源自于国外还是中国31省市自治区之间的物质交换。区域内开采占物质需求总量的比重因各省市自治区对外依赖程度的不同而有所差别,平均来看一般占物质需求总量的10%左右,并且呈现出下

降的趋势。

### 3.1.4 水的输入

水是社会经济系统物质输入必不可少的组成部分。从总量上看,1995-2014年,各省市自治区水的输入量增长相对平缓,平均增长1.5倍。相对于高速增长的生产总值,其增长速度明显较低,这说明水的使用效率在不断提高。随着时间的推移,水的投入量在物质需求总量中的比重呈现下降的趋势。虽然水的投入增长速度较慢,所占比重逐年降低,但绝对量的增长依旧巨大,所以水资源的生态保护工作仍然任重道远。

## 3.2 物质输出规模结构分析

### 3.2.1 物质输出规模

从输出经济系统的物质规模上看,在2004年之前广东省的物质总输出最大。2004年之后,山西的物质总输出超过广东省,从数值角度看,这是由于山西省不断向外出口原煤及煤炭制品所致,作为原煤产出大省,煤炭制品除了本省消耗外,其余出口到省外,但是产生的隐藏流却保留在本省境内,给山西的生态环境带来不可估量的损害。2008年之后,内蒙古超过山西成为物质总输出最大的省份,在统计数据上呈现的原因为内蒙古向其他地区出口更多的煤炭和电力,巨大的出口隐藏流造成了物质总输出的不断增加。物质总输出最小的省份为西藏自治区,这同其较少的人口,较低的物质出口以及经济依靠旅游业发展相关。

### 3.2.2 物质输出变化趋势

从物质输出的变化趋势看,计算得到的1995-2014年31省市自治区的物质总输出呈现出更为复杂的变化趋势。从总体上看,除重庆外其他30个省市自治区的物质总输出呈现出不断增加的趋势,但是这些增长趋势具体表现各不相同,出现了六种情况。

(1)匀速上升,物质总输出呈现这种趋势的省份包括北京、河北、上海、山东、广东及贵州,其年化复合增长率分别为:3.64%、3.31%、2.11%、6.38%、4.38%及5.45%。

(2)平稳发展且在总量上略有增加,表现出这种增长趋势的有辽宁、黑龙江和海南,这三个省的物质总输出年化复合增长率分别为1.4%、0.47%和

2017年9月

1.26%。

(3)随机波动,只有广西呈现出这种增长趋势,在1995-2014年间物质总输出围绕其均值28.88亿t上下波动。

(4)两阶段变化,包括内蒙古、河南、云南、陕西、甘肃、宁夏、天津以及新疆。变化趋势呈现平缓上升和急剧上升两个发展阶段,但是各地区的物质总输出发生变化的节点年份不同,这8个地区的节点分别为2003年、2009年、2004年、2002年、2009年、2008年、2002年及2000年。

(5)三阶段变化,包括浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、江苏、山西以及西藏。第一阶段为1995-2002年,表现为物质总输出基本不变或有轻微浮动;第二阶段为2003-2010年,表现为物质总输出急剧上升,其中增长最快的西藏自治区平均年化复合增长率为10.65%,增长最慢的湖南省平均增长率为3.05%;第三阶段为2011-2014年,表现为物质总输出平稳增长,只有湖北、湖南和山西由于受到出口隐藏流变化的影响,在这一时期出现了轻微波动。

(6)四阶段变化,包括吉林和四川,具体变化趋势为:物质总输出在1995-2002年处于平稳阶段,2004-2008年处于波动阶段,2009-2011年急剧上升,总量增长约为50%,2012-2014年再次步入平稳阶段。

### 3.2.3 物质输出结构

从物质输出构成来看,大部分地区的区域内总输出占了物质总输出的70%以上,山西、内蒙古和宁夏部分年份的出口隐藏流占物质总输出的比重超过50%以上。区域内总输出中废物排放所占的比重最大,绝大多数省份超过80%,耗散性物质所占比重最小,个别省份的部分年份其耗散性物质占物质总输出的比重不足0.1%。总的来说,出口物质占物质总输出的比重逐年增加,这与逐年增加的各省进口物质相一致。这表明,随着经济的发展,各省市自治区之间的物质交换加强,往来更加密切。

## 3.3 生态效率评价

本文使用物质生产力(MP)以及物质排放强度(WI)两个指标来衡量中国1995-2014年31省市自

治区的环境—经济系统的生态效率水平。其中物质生产力=GDP/物质需求总量,物质生产力越大意味着单位资源生产的产品及服务的价值越大,说明物质投入的效率越高,经济系统的可持续发展水平越高。物质排放强度=废弃物排放/GDP,排放强度越小则意味着生产单位产品及服务的所需要排放的废弃物越少,创造单位经济价值对环境的污染程度越小,对自然生态系统的影响越小。为方便比较,GDP经生产指数调整,是以1995年为基期的区域生产总值。具体分析结果如下:

### 3.3.1 物质生产力

物质生产力衡量的是经济系统的资源使用效率。1995-2014年,31省市自治区的物质生产力无一例外地呈现出直线上升的趋势。同1995年相比,2014年各地区的物质生产力平均增长了4.16倍,年复合增长率为7.39%。其中相对与东西部地区,中部地区的物质生产力增长最为迅速,平均增长了4.94倍,年化复合增长率为8.31%;物质生产力增长最慢的西部地区,平均增长了2.90倍;东部地区物质生产力平均增长了3.12倍,年化复合增长率为5.47%。从绝对量上看,东部地区的物质生产力远高于中、西部地区,1995年东部地区的物质生产力平均高达204.24元/t,到2014年平均为637.44元/t。而1995年中、西部地区的物质生产力平均分别为101.56元/t和95.74元/t,为东部地区的49.73%和46.88%。2014年中、西部地区的物质生产力平均为501.56元/t和277.19元/t,为东部地区的78.68%和43.48%。

从社会经济系统可持续发展的角度来看,中国东、中、西部地区资源使用效率存在巨大差异。这种差异源自于东部地区是中国最早开放的区域,率先利用政策优势,吸引国外投资进行发展,形成了包括循环经济规划、生态工业园区建设、生态城市建设在内的多种可持续发展实践,从而促进了东部地区产业结构的优化升级,固定资产存量增加,城市生态化水平提升。在这种情况下,东部地区利用本地区自然资源及社会经济发展优势,充分发挥外引内联和对外对内两个辐射扇面作用,形成了强大的社会经济系统自我发展能力,从而快速提升了东部地区资源使用效率。



### 3.3.2 物质排放强度

物质排放强度衡量的是单位 GDP 的废弃物排放强度。在研究期内,相对于逐年增长的废弃物排放总量,31 省市自治区创造单位 GDP 所排放的废弃物数量呈现出逐年下降的趋势。2014 年各地区的单位 GDP 废弃物排放量平均为 1995 年的 0.1603,平均以每年 8.75% 的速度递减。相对于东西部地区,中部地区污染物排放强度减少的速度最快,平均每年减少了 10.57%,2014 年的物质排放强度仅为 1995 年的 0.1070。物质排放强度减少速度最慢的为西部地区,2014 年单位 GDP 排放的废弃物数量为 1995 年的 0.1659,平均每年减少了 8.68%。东部地区在 2014 年的物质排放强度为 1995 年的 0.1625,平均每年减少了 8.86%。

从物质排放强度的绝对数量上看,中部地区的物质排放强度始终高于东西部地区。1995 年中部地区的物质排放强度为 11.02kg/元,2014 年为 1.18kg/元。东部地区在 1995 年和 2014 年的物质排放强度分别为 6.02kg/元和 0.98kg/元。西部地区的物质排放强度在 1995 年和 2014 年分别为 5.29kg/元和 0.88kg/元。可见在研究期内,中部和东西部地区的区域差异在逐渐缩小,各地区的废弃物排放强度都有了明显的改善,环境生态效率有显著的提升,可持续发展水平不断提高。

### 3.4 综合指数分析

为衡量经济增长与生态环境压力的协同效应,本文采用弹性系数( $EC$ )来测量经济增长与资源消耗之间的分异程度。 $EC = \text{物质消耗增长速度} \div \text{GDP 年增长速度}$ 。当  $0 < EC < 1$  时,物质消耗的增长速度小于经济的增长速度,研究区处于“相对脱钩”的状态。当  $EC < 0$  时,有两种情况,一是经济的增长速度大于 0 而物质消耗的增长速度小于 0,说明经济的增长使得生态环境压力减少,此时研究区处于“绝对脱钩”状态;二是经济增长的速度小于 0 而物质消耗的速度大于 0,说明巨大的物质消耗不但没有促进经济增长反而使得经济衰退,研究区处于“强复钩”状态。当  $EC > 1$  时,研究区处于“复钩”状态,经济的增长以巨大的物质消耗为代价。由于年增长速度的计算,研究期变为 1996-2014 年。

### 3.4.1 物质消耗弹性系数

从整体上看,在研究期内 31 省市自治区的区域物质消耗弹性系数多数位于  $(0, 1)$  区间,19 年中有 66.04% 的年份处于“相对脱钩”状态,21.90% 的年份处于“绝对脱钩”的状态。这表明,中国各省市自治区经济的发展促进了资源、环境和生态压力的减少,对于实现资源节约型、环境友好型社会有着重要的意义。

从变化趋势来看,各地区的物质消耗弹性系数总共有四种变化趋势。

(1) 脱钩-复钩,北京、山西、内蒙古及江西符合这种变化趋势,物质消耗增长随着经济的增长而加快。北京在 1999 年由于经济增速出现负值,因而处于“强复钩”状态,这是一个危险的信号,值得深思。

(2) 脱钩-复钩-脱钩,包括天津、河北、辽宁、黑龙江、江苏、浙江、安徽、福建、山东、湖北、湖南、重庆、贵州、云南、甘肃、青海、宁夏、新疆。这种变化趋势表明:最初经济的发展以快速的物质消耗为代价,人们对环境状况并不关注,只是一味的追求经济增长。但随着经济的发展,先进的技术得到使用,伴随着社会分工的不断细化和产业的不断升级,生产相同的产品和服务所需的物质减少,因而当区域物质消耗弹性系数达到顶峰之后开始下降,最终又回归到“脱钩”状态。

(3) 波动状态,在“脱钩”和“复钩”间摇摆不定,包括河南、广西、海南、四川及陕西。直到 2014 年,这几个地区最终位于“相对脱钩”状态。

(4) 一直处于“脱钩”状态,包括广东、上海、西藏和吉林。这种状态表明:经济增长给资源环境带来的压力不断减弱,经济环境的可持续发展在这些省市自治区得到实现。

### 3.4.2 物质输出弹性系数

物质输出弹性系数从经济系统的输出端考察经济增长与物质输出的分异程度。在研究期内 31 省市自治区的区域物质总输出弹性系数多数位于  $0 \sim 1$  之间,19 年中 44.82% 的年份各研究区处于“相对脱钩”状态,33.62% 的年份处于“绝对脱钩”状态,说明经济的增长促进了废物排放的减少,经济的发展对改善环境状况起到积极作用。

从变化趋势来看,各地区的物质输出弹性系数

2017年9月

共有四种变化趋势。

(1)脱钩-复钩,包括山西、内蒙古、辽宁及河南。其中内蒙古的“复钩”程度最为严重,其物质总输出弹性系数在2013年高达33.71。

(2)脱钩-复钩-脱钩的三阶段变化,包括北京、天津、河北、福建、黑龙江、江苏、广东、江西、湖北、海南、贵州、云南、陕西及青海。说明中国大部分地区的经济增长促进了输出到环境中的物质的减少。

(3)波动趋势,表现为“脱钩”与“复钩”之间不断变换,包括吉林、浙江、上海、安徽、山东、湖南、广西、四川、甘肃、宁夏、新疆以及西藏。

(4)一直处于“脱钩”状态,这是最为理想的变化趋势,只有重庆市的经济发展与废物排放之间的关系处于这种理想状态。

同物质消耗弹性系数相比,物质输出弹性系数变化趋势表现出的波动性更强,有更多的省市自治区在2014年呈现出“复钩”状态。这说明在减少环境污染方面,值得去做的还有很多。

### 3.5 生态压力指标的环境库兹涅茨曲线分析

本文中选取人均生态压力指标的对数  $\ln DMC$ 、 $\ln TMO$ 、 $\ln TMR$ 、 $\ln Waste$  作为衡量生态环境水平的指标,其中  $DMC$  为区域内物质消耗量,  $TMR$  为物质需求总量,  $TMO$  为物质总输出,  $Waste$  为废物排放。以面板数据为样本数据集建立计量模型,首先要求对面板数据进行单位根检验和协整检验,如果数据之间存在长期关系,才能对模型形式进行判断,从而对相应的计量模型进行估计。

#### 3.5.1 单位根检验

使用 LLC、IPS、Fisher-ADF 和 Fisher-pp 四种检验法对  $\ln DMC$ 、 $\ln TMO$ 、 $\ln TMR$ 、 $\ln Waste$ 、 $\ln GDP$ 、 $(\ln GDP)^2$ 、 $(\ln GDP)^3$  序列的单位根进行检验,结果表明:上述序列在以上四种检验方法下均无法拒绝“存在单位根”的原假设,说明各序列中存在单位根。进一步对面板数据一阶差分后的数据进行单位根检验,结果表明以上四种检验均拒绝“存在单位根”的原假设,此时序列平稳。通过以上检验证明,各序列存在一个单位根,为同阶单整序列。

#### 3.5.2 协整检验

使用 Panel pp、Panel ADF、Group pp 和 Group

ADF 四种检验方法对序列  $\ln DMC$ 、 $\ln TMO$ 、 $\ln TMR$ 、 $\ln Waste$ 、 $\ln GDP$ 、 $(\ln GDP)^2$ 、 $(\ln GDP)^3$  协整关系进行检验。结果表明:除被解释变量为  $\ln DMC$  的 Group ADF-Statistic 检验在 10% 的显著性水平下不显著外,其余的各检验统计量均在 1% 的显著水平下拒绝“不存在协整关系”的原假设。由此可以说明序列  $\ln DMC$ 、 $\ln GDP$ 、 $(\ln GDP)^2$ 、 $(\ln GDP)^3$ 、序列  $\ln TMO$ 、 $\ln GDP$ 、 $(\ln GDP)^2$ 、 $(\ln GDP)^3$ 、序列  $\ln TMR$ 、 $\ln GDP$ 、 $(\ln GDP)^2$ 、 $(\ln GDP)^3$  和  $\ln Waste$ 、 $\ln GDP$ 、 $(\ln GDP)^2$ 、 $(\ln GDP)^3$  各序列变量间长期趋于一致,协整关系存在。

#### 3.5.3 面板模型设定形式检验

建立面板模型需要判断其设定形式,相应的 F 检验及 Hausman 检验结果如表 2 所示。两个 F 统计量分别在 5% 的显著性水平下拒绝原假设,因而以人均  $\ln DMC$ 、 $\ln TMR$ 、 $\ln TMO$ 、 $\ln Waste$  为被解释变量的 EKC 曲线应该采用变系数模型。Hausman 检验验证以人均  $\ln DMC$ 、人均  $\ln TMO$ 、人均  $\ln TMR$  以及人均  $\ln Waste$  为被解释变量的方程均在 5% 水平下拒绝原假设,最终方程设定为固定效应的变系数模型。

#### 3.5.4 计量模型选择

由于中国 31 省市自治区在经济发展水平上存在差异,因而模型中存在横截面异方差和同期相关,本文将使用 GLS 法对模型进行估计。首先对同时包括人均 GDP 对数的平方项、立方项的模型进行估计,并根据其系数的 t 值以及 Wald 检验来判断环境指标与经济增长之间是否存在“倒 U”型、“U”型、“倒 N”型或“N”型关系。若人均 GDP 的平方项或立方项不显著,则将其去掉,再对模型进行重新估计,

表 2 面板数据模型设定形式检验结果

Table 2 Panel data model setting test results

被解释变量		$\ln DMC$	$\ln TMO$	$\ln TMR$	$\ln Waste$
F 检验	$F_1$ 值	113.034	54.575	53.509	52.544
	结果				
	$F_1$ 值	14.126	24.755	10.165	22.833
	临界值		1.36		
Hausman	结论	变系数	变系数	变系数	变系数
	$\chi^2$ 值	9.538	28.092	12.332	10.884
	检验结果	P 值	0.020	0.000	0.012
	结论	固定效应	固定效应	固定效应	固定效应



以更好地拟合样本数据。以  $\ln DMC$ 、 $\ln TMR$ 、 $\ln TMO$  及  $\ln Waste$  为被解释变量方程的  $R^2$  值和调整后的  $R^2$  均大于 0.93, 这说明生态压力指标变化趋势同经济增长相关。 $\beta_{1i}$ 、 $\beta_{2i}$ 、 $\beta_{3i}$  均在 10% 的显著性水平下显著。 $F$  检验高度显著, 表明解释变量很好的解释了被解释变量, 模型可以用于实际问题分析。

### 3.5.5 回归结果分析

相应的回归结果如表 3 所示。生态压力指标同经济增长之间的关系呈现出以下六种趋势:

表 3 EKC 回归结果

Table 3 EKC regression results

生态压力指标	$TMR$	$DMC$	$TMO$	$Waste$
北京	倒“U”型	倒“U”型	倒“U”型	上升
天津	倒“N”型	倒“N”型	倒“U”型	倒“N”型
河北	倒“N”型	倒“N”型	倒“U”型	上升
山西	倒“N”型	“U”型	倒“U”型	“U”型
内蒙古	上升	倒“U”型	“U”型	上升
辽宁	上升	倒“N”型	“U”型	上升
吉林	上升	倒“N”型	倒“U”型	上升
黑龙江	“U”型	倒“N”型	“U”型	“U”型
上海	上升	倒“U”型	倒“U”型	下降
江苏	上升	倒“N”型	倒“U”型	下降
浙江	上升	倒“N”型	倒“U”型	上升
安徽	倒“N”型	“U”型	倒“U”型	“U”型
福建	上升	倒“N”型	“N”型	“N”型
江西	倒“N”型	倒“N”型	“N”型	“N”型
山东	倒“N”型	倒“U”型	倒“U”型	上升
河南	倒“N”型	“U”型	“U”型	上升
湖北	倒“N”型	倒“N”型	倒“U”型	“U”型
湖南	上升	“U”型	“U”型	“U”型
广东	倒“U”型	倒“U”型	倒“U”型	上升
广西	上升	倒“U”型	倒“U”型	倒“N”型
海南	倒“N”型	倒“N”型	“U”型	下降
重庆	倒“N”型	倒“N”型	“U”型	倒“U”型
四川	上升	“U”型	“U”型	倒“N”型
贵州	上升	“U”型	倒“U”型	“U”型
云南	上升	倒“N”型	“U”型	“U”型
陕西	“N”型	倒“U”型	倒“U”型	倒“N”型
甘肃	“N”型	“U”型	“N”型	上升
青海	“U”型	倒“U”型	倒“U”型	倒“U”型
宁夏	上升	倒“U”型	倒“U”型	倒“U”型
新疆	“U”型	“U”型	“U”型	上升
西藏	上升	倒“U”型	“N”型	“N”型

(1) 上升关系, 生态压力指标同经济增长之间呈现正相关关系, 表明经济的增长依赖于巨大的物质消耗或废弃物排放, 经济增长和生态环境压力之间没有实现“脱钩”, 资源环境压力成为抑制经济发展的不利因素。

(2) 下降关系, 生态压力指标同经济增长间呈现负相关关系, 表明经济的增长带来物质消耗或废弃物排放的减少, 在经济快速增长的情况下, 实现了物质消耗或废弃物排放的绝对减少。

(3) “N”型曲线, 这说明经济的发展在研究初期的某一阶段实现经济增长同物质消耗或污染排放的相互分离, 但是由于人们更多的注重经济增长而非环境保护, 对资源节约利用和减少污染排放的认识不够深入, 又使得二者在近期呈现出正相关关系。

(4) 倒“N”型曲线, 表明经济增长同物质消耗或废物排放的“脱钩”状态出现了反复, 经济发展应尽可能的避免这种情况发生, 使得环境与经济增长同时实现可持续发展。

(5) “U”型曲线, 表明经济的增长没有使得物质消耗或废物排放减少, 反而使得环境压力增加。这种发展态势不利于环境的可持续发展, 相关地区政府应该采取有效的政策措施, 使两者呈现出负相关关系。

(6) 倒“U”型曲线, 表明在经济发展的初期, 经济的增长依赖于巨大的物质消耗或废弃物排放, 经济增长到某一转折点之后, 由于环保意识的提高, 新技术得到应用、新工艺得到施行、产业结构得到调整等, 这些措施降低了资源消耗和废弃物排放, 带来相对物质消耗或废弃物排放的减少, 最终实现了经济增长同环境压力的“脱钩”。

## 4 结论

(1) 从经济系统的物质输入端来看, 1995-2014 年中国 31 省市自治区的物质需求总量极大的受到了经济增长的影响。在经济活动中直接浮于表面的物质流已经很庞大, 但是隐藏在这些直接的物质流动之下的生态包袱更加惊人。隐藏流占物质需求总量的 80%, 随着人们生活舒适度和精致度的不断提高, 我们使用的产品动用了大量的物质, 给生态环境带来沉重负担。如何通过技术进步和提升

2017年9月

管理水平来减少隐藏流,将成为区域环境保护工作的重点。随着区域物质往来中的隐藏流所占的比重不断增加,从整体的角度进行合理的产业调整和科学的宏观调控是实现经济可持续发展的必然选择。

(2)从经济系统的物质输出端来看,物质总输出同物质需求总量成正比。区域物质总输出在1995-2014年间急速增长。相对于物质需求总量,其增长趋势更为复杂。废物排放为区域物质输出的最主要的组成部分,减少生产和生活中的废物排放将有利于减轻生态环境压力,改善环境质量。

(3)从物质生产力角度看,中国31省市自治区在过去的20年间,其资源的使用效率都得到了空前提高,但是东、中、西部地区间存在巨大差异。1995-2014年物质排放强度有了明显降低,而且区域间差距逐渐缩小,说明在污染排放方面各地区取得了一定的成果。

(4)对经济增长与生态环境压力的弹性系数进行研究表明,1995-2014年中国31省市自治区大多数年份处于“脱钩”状态,这表明各地区的物质消费以及废物排放与经济增长逐步实现脱离,经济环境系统运行逐渐步入良性循环的轨道。

(5)各地区人均区域内物质消耗、人均物质需求总量对数、人均物质总输出、人均废物排放与经济增长之间存在长期的稳定关系。运用固定效应的变系数面板数据模型建立的EKC曲线表明,1995-2014年间,部分省市自治区实现了各生态压力指标同经济增长之间的倒“U”型关系和下降关系。但是依旧有部分地区的生态压力指标同经济增长之间呈现出不可持续的“U”型、“N”型关系或上升关系。

总的来说,研究期内中国31省市自治区的资源利用效率提升要明显优于废弃物排放强度的降低。也就是说,经济的发展使现阶段的中国更多的关注于如何有效地利用资源以生产更多的产品和服务。但是,对于如何减少废弃物的排放和循环再利用则做的明显不够。只有转变已有的线性物质流动模式,建立物质能量封闭循环的产业经济系统,现代化进程中的中国才能真正意义上的实现环境同经济的协调发展。

## 参考文献(References):

- [1] 程欢,彭晓春,陈志良,等. 基于可持续发展的物质流分析研究[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(10): 142-146. [Cheng H, Peng X C, Chen Z L, et al. Progress of material flow analysis based on sustainable development[J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(10): 142-146.]
- [2] 彭建,王仰麟,吴健生. 区域可持续发展生态评估的物质流研究进展与展望[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 189-195. [Peng J, Wang Y L, Wu J S. Progress and prospect of material flow analysis in the ecological assessment of regional sustainable development[J]. *Resources Science*, 2006, 28(6): 189-195.]
- [3] 刘敬智,王青,顾晓薇,等. 中国经济的直接物质投入与物质减量分析[J]. 资源科学, 2007, 27(1): 46-51. [Liu J Z, Wang Q, Gu X W, et al. Direct material input and dematerialization analysis of Chinese economy[J]. *Resources Science*, 2007, 27(1): 46-51.]
- [4] Schutz H, Steurer A, Eurostat. Economy-Wide Material Flow Account and Derived Indicators: A Methodological Guide[M]. Luxembourg: Statistical Office of the European Union, 2001.
- [5] EURSTAT. Material Use in the European Union 1980- 2000: Indicators and Analysis[R]. Luxembourg: Statistical Office of the European Union, 2002.
- [6] Adriaanse A, Bringezu S, Hammond A, et al. Resources Flow: The Material Base of Industrial Economies[R]. Washington DC: World Resource Institute, 1997.
- [7] Mathew W, Bringezu S. The Weight of Nations Material Outflows from Industrial Economies[R]. Washington DC: World resource Institute, 2000.
- [8] 徐一剑,张天柱,石磊,等. 贵阳市物质流分析[J]. 清华大学学报自然科学版, 2004, 44(12): 1688-1691. [Xu Y J, Zhang T Z, Shi L, et al. Material flow analysis of Guiyang City[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2004, 44(12): 1688-1691.]
- [9] 黄和平,毕军. 基于物质流分析的区域循环经济评价-以常州市武进区为例[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 20-27. [Huang H P, Bing J. Evaluating regional circular economy based on MFA: A case study in Wujin District of Changzhou City[J]. *Resources Science*, 2006, 28(6): 20-27.]
- [10] 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[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2473-2480. [Zhang B, Huang H P, Bi J. Material flow analysis and data envelopment analysis based regional eco- efficiency analysis: Case study of Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2473-2480.]
- [11] 陈东景,郑伟,郭惠丽,等. 基于物质流分析方法的生态海岛建设研究-以长海县为例[J]. 生态学报, 2014, (1): 154-162.

- [Chen D J, Zheng W, Guo H L, *et al.* Evaluation of ecological Marine Island construction based on material flow analysis: A case study of Changhai County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, (1):154-162.]
- [12] 陈效速,赵婷婷,郭玉泉,等. 中国经济系统的物质输入与输出分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(4): 538--547. [Chen X Q, Zhao T T, Guo Y Q, *et al.* Material input and output analysis of economy system[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis*, 2003, 39(4): 538-547.]
- [13] Bouman M, Heijungs R, Voet E M, *et al.* Material flows and economic models: An analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models[J]. *Ecological Economics*, 2000, 32(2):195-216.
- [14] 黄和平,毕军,张炳,等. 物质流分析研究述评[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 368-379. [Huang H P, Bi J, Zhang B, *et al.* A critical review of material flow analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1):368-379.]
- [15] Brunner P H, Rechberger H. Practical Handbook of Material Flow Analysis [M]. Washington, D.C.: Lewis Publishers, 2004.
- [16] 毕军,黄和平,袁增伟,等. 物质流分析与管理[M]. 北京:科学出版社, 2009. [Bi J, Huang H P, Yuan Z W, *et al.* Material Flow Analysis and Management[M]. Beijing: Science Press, 2009.]
- [17] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴 1995-2014 [M]. 北京:中国统计出版社, 1995-2014. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Energy Statistics Yearbook 1995- 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 1995-2014.]
- [18] 尹科. 珠三角环境经济系统的物质流分析[D]. 长沙:湖南农业大学. 2009. [Yin K. Material Flow Analysis of Environmental Economic System in Pearl River Delta[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009.]
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 中国工业经济统计年鉴 1995-2014[M]. 北京:中国统计出版社, 1995-2014. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Industrial Statistics Yearbook 1995- 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 1995-2014.]
- [20] 易桂初. 乡镇经济统计学[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 1987. [Yi G C. Rural Economic Statistics[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1987.]
- [21] 蒋德明,刘志民,曹成有,等. 科尔沁沙地荒漠化过程与生态恢复[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2003. [Jiang D M, Liu Z M, Cao C Y, *et al.* Desertification and Ecological Restoration of Keerqin Sandy Land[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.]
- [22] 鲍智弥. 大连市环境-经济系统的物质流分析[D]. 大连:大连理工大学. 2010. [Bao Z Y. Material flow analysis of Dalian Environmental Economic System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.]
- [23] 楼俞. 城市物质代谢分析方法建立与实证研究[D]. 北京:清华大学, 2007. [Lou Y. Establishment and Empirical Analysis of Urban Material Metabolism[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.]
- [24] 陈效速,乔立佳. 中国经济-环境系统的物质流分析[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 17-23. [Chen X Q, Qiao L J. Material flow analysis of Chinese economic- environmental system[J]. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(1): 17-23.]



# Environmental efficiency evaluation of regional economic systems based on material flow analysis

XIA Yanqing<sup>1,2</sup>, LI Shuyin<sup>1,2</sup>

*(1. School of Economic, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China;*

*2. Center for Econometric Analysis and Forecasting, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China)*

**Abstract:** In order to analyze the material utilization efficiency and influence of pollutant emissions on economic systems, material flow analysis and Environmental Kuznets curve were used for 31 provinces and autonomous regions in China. First, based on EU guidelines for material flow and panel data of actual conditions for 31 provinces and autonomous regions in China from 1995-2014, we compared material reduction indexes at a regional level in order to evaluate the level of economic sustainable development and corresponding environmental efficiency. Then we used material reduction indexes to build a model of China's environmental Kuznets curve in order to empirically test the existence of the environmental Kuznets curve. We found that during the study period, the material input and output size of each province and autonomous region increased continuously. The improvement of the efficiency of material consumption was significantly better than the reduction in waste emissions. In most cases, the relationship between economic growth and material input or waste emissions achieved decoupling. Material utilization efficiency and reductions in waste emissions have been improved in China. However, all provinces and autonomous regions have not altered the existing linear material flow pattern. Only by transforming existing linear material flow patterns and establishing industrial economic systems for the closed cycle of material energy, can China realize the coordinated development of the environment and economy.

**Key words:** environmental Kuznets curve; environmental ecological efficiency evaluation; sustainable development; material flow analysis