

碳排放分解：理论基础、 路径剖析与选择评判

渠慎宁

摘要 温室气体排放分解分析作为研究事物变化特征及其作用机理的一种分析框架，在环境经济研究中得到越来越多的应用。作者介绍了目前较为常用的几种分解方式，并对其进行比较。碳排放指数分解分析方法通常利用能源恒等式将碳排放量表示为几个因素指数的乘积，根据不同的权重确定方法进行分解，以明确各个指数的增量份额；这类方法适用于对含有较少因素的模型进行分解，并适合处理时间序列数据，进行跨国比较，主要包括 Laspeyres 类指数分解与 Divisia 类指数分解。其中，LMDI I 方法凭借无残差、易使用等优点得到了较为广泛的运用。结构分解分析方法则可进行更为系统的分析，能针对较多影响因素模型进行分解，解析各因素对排放量的影响，但这种方法对数据收集有较高的要求。结构分解分析方法与碳排放分解分析方法最大的区别在于前者基于投入产出系统，而后者则只需使用部门加总数据。

关键词 碳排放 指数分解分析 结构分解分析 LMDI I

【中图分类号】X196 【文献标识码】A 【文章编号】2095 - 851X (2019) 03 - 0098 - 15

近年来，全球气候变化问题成为社会关注的焦点，学术界开始尝试发掘影响温室气体排放变化的深层次因素，从而更深入地探究气候变化的成因和影响。一般看来，温室气体排放量是由一个国家的技术水平、富裕程度、能源结构、经济结构、人口结构等众多因素共同作用决定。传统观点认为随着人类财富的增加，日益增长的能源消费是排放量增加的主要原因，并未考虑人口、技术等因素 (Kaya, 1989)。随着研究的深入，一些实证研究表明人口、经济、技术等均为决定排放量的重要因素，这些决定因素在不同的国家对排放量的贡献程度也存在差异。目前，分解分析作为研究事物

【基金项目】国家社会科学基金青年项目“我国绿色发展的产业支撑问题研究”（批准号：17CGL002）；中国社会科学院“登峰战略”优势学科产业经济学（2019年）。

【作者简介】渠慎宁（1986-），中国社会科学院工业经济研究所副研究员，邮政编码：100836。

致谢：感谢审稿专家的匿名评审意见，文责自负。

的变化特征及其作用机理的一种分析框架, 在环境经济研究中得到越来越多的应用。针对排放影响因素进行分解, 定量分析因素变动对排放量变动的影 响, 逐渐成为研究这类问题的有效技术手段。

一、碳排放分解分析的基础

碳排放分解分析通常是基于能源恒等式, 首先建立碳排放量与其相关影响因素之间的数量关系, 再对排放的变化量进行分解。目前较为常用的能源恒等式有 IPAT 类恒等式与 Kaya 恒等式。IPAT 恒等式由 Ehrlich 和 Holdren (1970) 提出, 反映人口对环境压力的影响。该方程将环境影响和人口规模、人均财富以及与环境相关的技术水平联系起来, 建立四者之间的恒等式: $IMPACT (I) = POPULATION (P) \times AFFLUENCE (A) \times TECHNOLOGY (T)$ 。IPAT 恒等式主要可用于探求影响排放变化背后的各驱动因素。其中, I 代表排放量, P 代表人口, A 代表财富, T 代表技术或经济活动的能源效率。在此基础上, Waggoner 和 Ausubel (2002) 对 IPAT 恒等式进行了延伸, 将技术水平 T 进一步分解为单位 GDP 所消耗的技术 (C) 与每单位技术对环境的影响 (T) 之积, 得出 ImPACT 恒等式, 即 “ $I = PACT$ ”。然而, York 等 (2002) 认为 IPAT 及 ImPACT 模型均存在一些局限性: 若分析问题 时仅改变一个因素, 而保持其他因素固定不变, 得出的结果即为变化因素对因变量的等比例影响, 这种纯线性关系与实际情况存在出入; 为了修正 IPAT 模型的不足, 分析人口因素对环境因变量的非线性变化影响, 作者又进一步在 IPAT 模型的基础上建立了 STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology) 模型, 即: $I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i$ 。等式两边取对数即可将该模型改写成加法模式: $\ln I_i = a + b \ln P_i + c \ln A_i + d \ln T_i + e_i$ 。

Kaya 恒等式由 Kaya (1989) 提出, 该式与 IPAT 的分析框架不同, 将经济、政策和人口等因素与人类活动产生的二氧化碳排放联系起来, 具体表述为: $CO_2 = \frac{CO_2}{PE} \times \frac{PE}{GDP} \times \frac{GDP}{POP} \times POP$ 。其中, CO_2 、 PE 、 GDP 和 POP 分别代表二氧化碳排放量、一次能源消费总量、国内生产总值以及国内人口总量。其中, $\frac{CO_2}{PE}$ 、 $\frac{PE}{GDP}$ 、 $\frac{GDP}{POP}$ 又分别被称为能源结构碳强度 (IC)、单位 GDP 能源强度 (IE)、人均国内生产总值 (G)。Kaya 恒等式反映了一国能源结构与经济结构对排放量的影响, 能够发掘导致碳排放变化的深层次因素。同时, Kaya 恒等式又具有较好的延伸性, 使用过程中可根据实际情况对各因素进行进一步分解, 因此 Kaya 恒等式在碳排放分解问题中的应用也较为广泛。

碳排放分解方法经过 40 年的研究发展, 方法学体系常用的分解方法大致可分为两

大类: 指数分解分析 (Index Decomposition Analysis, IDA) 与结构分解分析 (Structural Decomposition Analysis, SDA)。相比之下, IDA 法更为简单, 最早发源于 20 世纪 70 年代的工业能源消费分解研究, 适用面也更广。

二、碳排放指数分解分析评价

IDA 法通常利用能源恒等式将碳排放量表示为几个因素指数的乘积, 并根据不同权重确定方法对各因素进行分解, 以确定各个指数的增量份额。该方法的最大优点在于通过对子行业的分解能够追溯因变量指数能源效率或能源相关的环境变化的原因, 找出间接影响总指数的深层次因素, 从而为制定切实可行的政策措施提供依据。同时, 该方法还适于进行时间序列分析及跨国比较。IDA 法主要包括 Laspeyres 类指数分解法与 Divisia 类指数分解法。

(一) Laspeyres 类指数分解法

Laspeyres 指数法于 1864 年由德国数学家 E. Laspeyres 提出, 20 世纪 70 年代末至 80 年代初该思想逐步被运用于能源分解领域。通过固定其他要素于基年的值, 观察某要素在某段时间内波动给待考察总量带来的影响, 可以计算该要素带来的冲击程度, Jenne 和 Cattell (1983) 使用该方法测算了美国及英国工业领域内的能源消耗趋势。Laspeyres 分解法假定在 n 维空间中, 变量 V 可被分解为 n 个影响因素的乘积, 即 $V = \prod_{i=1}^n x_i$ 。在 $[0, T]$ 周期内, 变量 V 的值从 V^0 变为 V^T , 则有 $\Delta V = V^T - V^0 = \prod_{i=1}^n x_i^T - \prod_{i=1}^n x_i^0 = \prod_{i=1}^n \Delta V_{x_i}$, 其中, $x_i^T = x_i^0 + \Delta x_i$, Δx_i 为因素 i 在周期 $[0, T]$ 内的变动量。通过 Laspeyres 分解, 因素 x_i 对总量 V 的影响可表示为: $\Delta V_{x_i} = \frac{\prod_{k=1}^n x_k}{x_i} \Delta x_i$ 。

然而, Laspeyres 分解只是一种近似的分解方法, 分解方程左边有 $2^n - 1$ 项, 而方程右边仅有 n 项, 这表明有 $2^n - 1 - n$ 个二阶及二阶以上的 Δ 项被省略。

Laspeyres 分解法是所有 Laspeyres 类指数分解方法的基础, 并在此基础上又进一步发展出 Paasche 分解法、Marshall-Edgeworth 分解法、Fisher 分解法、Shapley 分解法、Sun 分解法等。鉴于 Laspeyres 指数分解方法存在残差项被省略、不够精确的问题, 一些学者逐步发展提出一些相关的修正方法。其中, 使用较为普遍的方法主要有三种。

1. Shapley 分解法

Shapley (1953) 在分析合作博弈问题时首先提出“Shapley 值”的概念, 后被广泛运用于研究成本分配问题。Albrecht 等 (2002) 将其扩展到能源和环境经济分析领域, 并运用该技术分解 1960—1996 年比利时、法国、德国和英国的碳排放, 发现碳的能源使用强度与经济增长带来的脱碳程度对碳排放影响最大。Shapley 分解方法避免了 Laspeyres 分解法面临的残差问题, 最后得到的结果更为精确。 n 个因素下 Shapley 分解的过程可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta V_{x_i} &= \sum_{i \in S \subseteq N \setminus S \mid S \mid = s} \frac{(s-1)!(n-s)!}{n!} [V(S) - V(S - \{i\})] \\ &= \sum_{i \in S \subseteq N \setminus S \mid S \mid = s} \frac{(s-1)!(n-s)!}{n!} \sum_{j=1}^m \left(\prod_{i \in S} x_{ij}^T \prod_{p \in N \setminus S} x_{jp}^0 - \prod_{i \in (S - \{i\})} x_{ij}^T \prod_{p \in N(S - \{i\})} x_{jp}^0 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $V(S)$ 是具有如下特征的函数: 当影响因素 x_i 在集合 S 内时, 使用 T 期的数据; 反之, 则使用 0 期的数据。

2. Sun 分解法

Sun (1998) 根据“联合创造与平均分配”(Jointly Created and Equally Distributed) 原则, 将 Laspeyres 分解法推广到全分解模式, 同样也能解决 Laspeyres 分解法面临的残差问题。该方法也被称为修正的 Laspeyres 分解法或全分解方法。根据该分解方法, 因素 x_i 对总量 V 变化的影响为:

$$\Delta V_{x_i} = \frac{\prod_{k=1}^n x_k}{x_i} \Delta x_i + \frac{1}{2} \sum_{i \neq p} \frac{\prod_{k=1}^n x_k}{x_i x_p} \Delta x_i \Delta x_p + \frac{1}{3} \sum_{i \neq p \neq q} \frac{\prod_{k=1}^n x_k}{x_i x_p x_q} \Delta x_i \Delta x_p \Delta x_q + \dots + \frac{\prod_{k=1}^n \Delta x_k}{n} \quad (2)$$

由于该方法是对 Laspeyres 分解的全分解, Zhang 和 Ang (2001) 称之为“修正的 Laspeyres 分解”方法。修正的 Laspeyres 分解法具备易于计算与理解等优点, 目前已被广泛应用于能源分解研究领域。Paul 和 Bhattacharya (2004) 使用该方法分析了印度 1980—1996 年二氧化碳排放变化的影响因素, 将其分解为四种因素的作用: 污染系数、能源强度、结构变化与经济增长, 并发现经济增长对碳排放量的变化影响程度最大。Zhang 等 (2009) 则用其探讨了中国 1991—2006 年二氧化碳排放变化的影响因素, 将二氧化碳排放变化量分解为四种因素: 二氧化碳强度、能源强度、经济结构、经济增长。同样发现经济增长与二氧化碳排放变化量的增加有显著正相关性, 而能源强度的提高则在一定程度上降低了排放量, 二氧化碳强度与经济结构的变化对排放量的影响程度相对较小。

Shapley 分解法与修正的 Laspeyres 分解法均为加法分解, 具有一定的相似性。Ang 等 (2009) 经过严格的数学推导证明了 Shapley 分解法完全等价于修正的 Laspeyres 分解法, 将 Shapley 分解法改写成 Laspeyres 指数形式时, 其表达式与修正的 Laspeyres 分解法完全相同。因此, Ang 等 (2009) 将上述两种方法统称为“S/S 分解法”(Shapley/Sun Method)。

3. 修正的 Fisher 指数分解法

Fisher (1922) 提出了著名的两要素 Fisher 指数公式, 后被 Liu 和 Ang (2003) 等人运用于排放分解问题的研究。假定 V 为一排放总指数, 其值受 x_1 、 x_2 两个因素的影响, 有 $V = \sum_i V_i = \sum_i x_{1i} x_{2i}$ 。下标 i 表示构成总指数的类别, 如所消耗能源的种类, 区域内的各个国家等。从时间点 0 到 T , V 值的变动水平 D 为: $D = \frac{V^T}{V^0} = \frac{\sum_i x_{1i}^T x_{2i}^T}{\sum_i x_{1i}^0 x_{2i}^0} = D_{x_1} D_{x_2}$ 。

其中, D_{x_1} 、 D_{x_2} 分别为因素 x_1 、 x_2 给 V 值的变化所带来的影响。利用 Fisher 指数公式, 则有:

$$D_{x_1} = \left(\frac{\sum_i x_{1i}^T x_{2i}^0}{\sum_i x_{1i}^0 x_{2i}^0} \cdot \frac{\sum_i x_{1i}^T x_{2i}^T}{\sum_i x_{1i}^0 x_{2i}^T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$D_{x_2} = \left(\frac{\sum_i x_{1i}^0 x_{2i}^T}{\sum_i x_{1i}^0 x_{2i}^0} \cdot \frac{\sum_i x_{1i}^T x_{2i}^T}{\sum_i x_{1i}^T x_{2i}^0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

然而, 由于现实中, 影响排放的因素通常不止两个, 传统的 Fisher 分解模型也逐渐面临一些局限性。Ang 等 (2004) 将其推广到 n 个因素模式下, 并称之为“修正的 Fisher 指数分解法”。目前该方法已成为基于 Laspeyres 分解原理的重要方法之一。

假定变量 V 受 n 个因素的影响, 有 $V = \sum_i x_1 x_2 \cdots x_n$ 。定义集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, 且 N 的基数为 n 。集合 S 为 N 的子集, 且 S 的基数为 s' 。定义函数 $V(S) = (\prod_{i \in S} x_i^T \prod_{m \in N \setminus S} x_m^0)$ 且有 $V(\phi) = \sum (\prod_{m \in N} x_m^0)$, 其中 ϕ 为空集。根据“几何平均”准则, 可将 D 分解为 n 个部分。 x_j 对 V 值变化的影响 D_{x_j} 为: $D_{x_j} = \prod_{j \in S}^{S \subset N} \left[\frac{V(S)}{V(S \setminus \{j\})} \right]^{\frac{(s'-1)(n-s)!}{n!}}$ 。上式即为一般情况下 Fisher 分解的表达式。当 $n=2$ 时, 该式即为传统 Fisher 分解法的表达式。相比于 Shapley 分解法与修正的 Laspeyres 指数分解法, 修正的 Fisher 分解法属于乘法分解。Ang 等 (2009) 认为修正的 Fisher 分解法即为 S/S 分解法的乘法表达式。

(二) Divisia 指数分解法

Divisia 指数分解法最先由 Boyd 等 (1987) 提出, 后经 Ang 等人的修正与发展, 目前已成为能源与环境经济分解研究领域内继 Laspeyres 指数分解外的又一类重要方法。Divisia 指数分解法主要包括 AMDI (Arithmetic Mean Divisia Index) 与 LMDI (Log Mean Divisia Index) 两种方法。Divisia 分解法通常假定一排放指数 V 受 n 个因素的影响, 有 $V = \sum_i x_{1i} x_{2i} \cdots x_{ni}$, 且 $V_i = x_{1i} x_{2i} \cdots x_{ni}$, 其中下标 i 表示构成总指数的类别, 如所消耗能源的种类等。指数 V 从 0 期的 $V^0 = \sum_i x_{1i}^0 x_{2i}^0 \cdots x_{ni}^0$ 变为 T 期的 $V^T = \sum_i x_{1i}^T x_{2i}^T \cdots x_{ni}^T$, 因此可在此基础上对 T 期内的排放变动量进行分解。Divisia 分解法一般具有乘法分解与加法分解两种形式。乘法分解模式为 $D_{tot} = V^T/V^0 = D_{x_1} D_{x_2} \cdots D_{x_n}$; 加法分解模式为 $\Delta V_{tot} = V^T - V^0 = \Delta V_{x_1} + \Delta V_{x_2} + \cdots + \Delta V_{x_n}$ 。

1. AMDI 分解法

AMDI 分解法由 Boyd 等 (1987) 提出, 其最初是乘法分解形式, 随后 Boyd 等 (1988) 又提出了该方法的加法分解形式。AMDI 与 LMDI 在很多情况下可以替代使用, 所得的分解结果通常也较为接近。通过 AMDI 分解, 分别可得出:

$$\text{乘法模式下: } D_{x_k} = \exp \left\{ \sum_i W_i^* \ln \left(\frac{x_{ki}^T}{x_{ki}^0} \right) \right\} \quad (5)$$

$$\text{加法模式下: } \Delta V_{x_k} = \sum_i W_i \ln \left(\frac{x_{ki}^T}{x_{ki}^0} \right) \quad (6)$$

其中 $W_i^* = \left(\frac{V_i^T}{V^T} + V_i^0/V^0 \right) / 2$, 且 $W_i = (V_i^T + V_i^0) / 2$ 。

2. LMDI 分解法

LMDI 分解法又可进一步分为 LMDI I 分解与 LMDI II 分解两类, 并均有乘法分解与加法分解的模式。Ang 等 (1998) 最先提出 LMDI I 的加法分解模式。随后 Ang 和 Liu (2001) 又提出了 LMDI I 的乘法分解模式。LMDI II 分解则由 Ang 和 Choi (1997) 提出。由于所得结果与 LMDI I 较为接近, 但计算过程更为复杂, 该方法并未得到普遍使用。

LMDI I 下乘法分解模式为 $D_{x_k} = \exp \left[\sum_i \frac{L(V_i^T, V_i^0)}{L(V^T, V^0)} \ln \left(\frac{x_{ki}^T}{x_{ki}^0} \right) \right]$; 加法分解模式为 $\Delta V_{x_k} = \sum_i L(V_i^T, V_i^0) \ln \left(\frac{x_{ki}^T}{x_{ki}^0} \right)$, 其中函数 $L(a, b)$ 为两正数 a, b 的对数平均值, 即:

$$L(a, b) = \begin{cases} \frac{a-b}{\ln a - \ln b}, & a \neq b \\ a, & a = b \end{cases} \quad (7)$$

LMDI II 下乘法分解模式为:

$$D_{x_k} = \exp \left[\sum_i \frac{L(w_i^T, w_i^0)}{\sum_j L(w_j^T, w_j^0)} \ln \left(\frac{x_{ki}^T}{x_{ki}^0} \right) \right] \quad (8)$$

$$\text{加法分解模式为: } \Delta V_{x_k} = \sum_i \frac{L(w_i^T, w_i^0)}{\sum_j L(w_j^T, w_j^0)} L(V^T, V^0) \ln \left(\frac{x_{ki}^T}{x_{ki}^0} \right) \quad (9)$$

其中 $w_i^T = V_i^T/V^T$, $w_i^0 = V_i^0/V^0$ 。

可见 LMDI I 与 LMDI II 两种分解方法在形式上非常相似, 差别仅在于 $\ln \left(\frac{x_{ki}^T}{x_{ki}^0} \right)$ 前的权重不同; 而 AMDI 分解法与 LMDI 分解法的区别在于前者的权重项为加权平均, 而后者的权重项为对数平均。

3. 方法应用领域

LMDI I 目前已成为最为流行的碳排放分解方法, 现有研究主要分为三个领域。

(1) 分析国家碳排放影响因素。Lee 和 Oh (2005) 利用 LMDI I 法分解了 APEC 国家或地区的二氧化碳排放变动量, 发现人均 GDP 与人口是导致二氧化碳排放量增长的主要因素。Hatzigeorgiou 等 (2008) 则分别利用 AMDI 分解法与 LMDI I 分解法

将希腊 1990—2002 年的二氧化碳排放变动量分解为收入、能源强度、能源节约指数与人口这四个因素的影响结果。结果表明收入是导致二氧化碳排放量变化的主要原因，而能源强度的提高对排放量的减少起着积极作用。同时，比较两种方法得出的结果可以发现 LMDI I 分解法比 AMDI 分解法有更高的精确度。Ma 和 Stern (2008) 利用 LMDI I 分解方法将中国 1971—2003 年碳排放的变化分解为六个因素的影响，包括矿物能源替代效应、生物质能替代效应、技术效应、无碳能源替代效应、经济规模效应、人口规模效应。分解测算结果显示，矿物能源替代效应、人口增长都是导致中国碳排放量的大量增加的主要因素。技术效应、经济规模效应自改革开放后对碳排放的影响与改革开放前相比有所改变。同时，中国人口增长对碳排放的边际影响正在减弱。

(2) 分析区域碳排放影响因素。Liu 等 (2012) 将视角进一步延伸到城市层次，其利用 LMDI I 分解法探究了北京、天津、上海和重庆四个城市在 1995—2009 年推动温室气体排放变化的驱动力量。他们发现，这四个城市温室气体排放增长主要受经济活动因素决定。而由进口能源使用导致的间接碳排放比重的增长，也表明这些大城市越来越依赖于周边区域的能源供给。因此，要减少温室气体排放，改变经济结构和区域经济增长模式至关重要。崔盼盼等 (2018) 核算了 2002—2012 年中国 30 个省份的城镇居民隐含碳排放，并用 LMDI I 分解法分析碳了排放的驱动机制及空间分异特征。研究结果表明：消费水平提高是各区域隐含碳排放增加的主要因素，其中最具有代表性的就是北部沿海区域；多数地区的人口规模效应对隐含碳排放的增加起到正向作用，强正向作用区域与东西部的人口分界线趋于一致；隐含碳排放强度效应是中国各省份隐含碳排放下降的决定因素。

(3) 分析行业发展对碳排放的影响。范建双和周林 (2019) 利用 Kaya 恒等式与 LMDI I 分解法对 1997—2015 年中国 30 个省份的碳排放进行了分解，重点考察了城镇化与房地产投资对碳排放的影响，发现城镇化对碳排放具有显著负影响，而城镇化房地产投资强度对碳排放具有促增效应，在两者交互作用下的直接效应和空间溢出效应显著为负。李波等 (2018) 利用 LMDI I 分解法和聚类分析法，讨论优化农地利用方式对湖北省农业碳排放的影响。其研究发现，1993—2015 年农地经济发展因素累积引发 276.33% 的湖北碳排放增量，占比最高；而 2005—2015 年生态退耕产生碳汇波动较大，从而导致林地和草地碳汇量呈现递减态势。因此，加强农地碳库建设和完善农地补偿制度将有助于推进湖北农地利用低碳化。赵玉焕等 (2018) 将国民经济七大行业分为资本密集型与劳动密集型，用 LMDI I 分解法将 1995—2014 年七大行业的碳排放分解成五种因素，并指出活动效应促进了除电力行业外的碳排放，而规模效应和能源结构效应分别对建筑业和电力行业的碳排放影响最大。

三、IDA 类分解方法之间的比较、选择与演进

综上所述，IDA 类分解法的主要分类如图 1 所示。

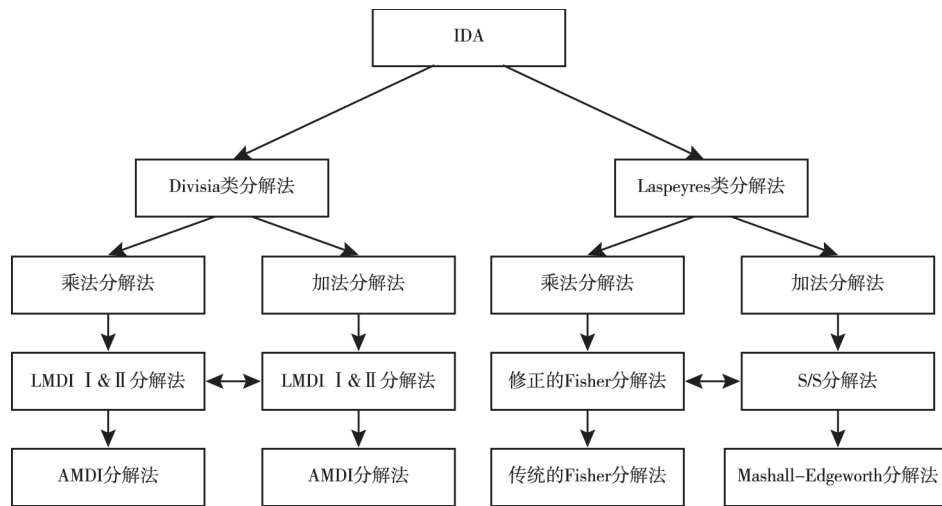


图1 基于 IDA 分解原理的主要分解方法

资料来源：作者根据 Ang (2004) 整理。

由于 IDA 类分解方法为数众多，面对问题时，应当选择何种方法成为实际应用中常会出现的问题。Ang (2004) 提出了评价分解方法的四个准则，包括理论评价 (Theoretical Foundation)、适应性 (Adaptability)、易用性 (Ease of Use)、结果的易理解性 (Ease of Result Interpretation)。首先，理论评价是基于指数理论 (Index Number Theory) 对分解过程进行测试。Ang 等 (2004) 提出了四种测试方法：因素反转测试 (Factor-Reversal Test)、时间反转测试 (Time-Reversal Test)、均衡性测试 (Proportionality Test) 与集聚测试 (Aggregation Test)。Hoekstra 和 van der Bergh (2003) 在其基础上又补充了零值时的稳健性 (Zero Value Robust) 与负值时的稳健性 (Negative Value Robust) 两种测试方法。在这六项测试方法中，因素反转测试检验最为重要，该测试检验分解方法是否会产生残差项，是否为全分解。通过该测试的方法即可认为是较理想的分解方法。Ang 等 (2004)、Hoekstra 和 van der Bergh (2003) 对目前常用的几种分解方法进行了测试 (见表1)，结果显示 S/S 分解法、修正的 Fisher 分解法与 LMDI 分解法均能通过因素反转测试。通过对各分解方法进行这六项测试，结果显示 S/S 分解法各项测试全部通过；排名第二的是修正的 Fisher 分解，通过了五项测试；排名第三的是 LMDI I 分解方法，通过了四项测试。就理论评价而言，这三种分解都是较为优秀的方法，值得学者们采用。

适应性准则是指该方法是否具有普遍适用性，能够解决大多数常见问题，如进行时间序列分析与跨国比较等。可以通过检验分解方法能否处理含有大量偏差的数据、零值与负值来判断是否满足该准则。易用性准则是评判不同分解方法对于使用者来说是否容易上手。结果的易理解性与分解方法的理论评价具有密切联系。一般情况下，

表1 不同分解方法的检验结果

分解方法	因素反转测试 (全分解测试)	时间反转 测试	均衡性 测试	集聚测试	零值时的 稳健性	负值时的 稳健性
Laspeyres 分解法	○	○	●	●	●	●
修正的 Fisher 分解法	●	●	●	○	●	●
S/S 分解法	●	●	●	●	●	●
AMDI 分解法	○	●	●	○	○	○
LMDI I 分解法	●	●	○	●	●	○
LMDI II 分解法	●	●	○	○	●	○

注 “○”表示未通过该测试，“●”表示通过该测试。

资料来源：作者根据 Ang 等（2004）、Hoekstra 和 van der Bergh（2003）整理。

全分解得出的结果要比有残差分解的结果复杂，因此相对较难理解。同时，结果的易理解性也与乘法分解、加法分解具有一定联系。在某些情况下，加法分解的结果较乘法分解更易理解，反之亦存在。因此，若某分解方法的加法分解模式与乘法分解模式的结果可相互转换，其将得到更高的易理解性评价。

需要指出的是，如表1所示，Divisia类分解方法中，AMDI分解法较LMDI分解法相比具有明显的缺陷。一方面，AMDI分解法未通过因素反转测试，不能进行全分解，从而会产生残差项，影响结果的精确性；另一方面，当数据集中含有零值时，AMDI分解法将无法处理。同样，Laspeyres类分解方法中，由于Laspeyres分解法不能通过因素反转测试与时间反转测试，修正的Fisher分解法与S/S分解法将会是更好的选择。Ang等（2004）认为在所有IDA类分解方法中，LMDI I分解法是最好的方法。首先，LMDI I分解法可以通过了因素反转测试与时间反转测试，不会产生残差项。其次，LMDI I分解法中的乘法分解可以转换成加法分解的形式。对乘法分解的公式两边取对数，则有 $\ln(D_{x_k}) = \sum_i \frac{L(V_i^T, V_i^0)}{L(V^T, V^0)} \ln\left(\frac{x_{ki}^T}{x_{ki}^0}\right)$ 。同时，Ang（2004）证明

了LMDI I分解法下的乘法分解与加法分解具有如下关系： $\frac{\Delta V_{x_k}}{\ln D_{x_k}} = \frac{\Delta V_{tot}}{\ln D_{tot}}$ 。与此相比，修正的Fisher分解法与S/S分解法均不具备这两种特征；另外LMDI I分解法的分解结果更容易被理解；而且LMDI I方法的分解过程较修正的Fisher分解法与S/S分解法更为简单，更易投入实际应用。然而，相比Laspeyres类分解方法，LMDI I分解法的主要缺陷在于无法处理负值数据。Ang和Liu（2007）使用“分析极限”的方法成功解决了这一问题。由此，LMDI I分解法可被用于解决任何分解问题，包括SDA方法下会出现的数据为负值或零值的情况。综上所述，在IDA类分解方法中，首选是LMDI I分解法，其次是S/S分解法，最后是修正的Fisher分解法。

随着需要分析的问题变得越来越复杂，一些学者对IDA分解方法进行了延伸与

改进,主要在以下几方面取得了积极进展。(1)改进 IDA 法进行贡献率分析。Choi 和 Ang (2012) 将传统的 IDA 法延伸到贡献率分析,以此来解决总量指数的增长率分解问题。在能源消费强度增长率成为政策制定者的关注目标后,贡献率分析对此尤其适用。González (2015) 将能源消费强度分析纳入了 LMDI 分解方法框架中,开发出一个新的分析模型来测算欧洲国家每一部门对能源消费强度因素的贡献率影响。研究结果发现,欧洲一些转型经济体国家的产业结构转型对能源消费强度的改进效应明显,而工业部门(包括建筑业)在欧洲主要国家给总量能源消费强度带来的均是负面影响。

(2)改进 IDA 法进行跨区域的能源消费或碳排放效果比较。Löschel 等(2015)利用世界投入产出表,研究了欧盟 27 国在 1995—2009 年的能源消费强度下降问题。其将能源消费强度的变化归因于一国工业结构的改变与工业部门能源这两个因素,并用 IDA 法对这两个因素的影响进行了分解,发现不同国家对这两个因素的不同控制程度,是造成各国能源消费强度差异的主要原因。为了更好地分析多区域问题,识别不同地域不同时间下碳排放的变化原因,给政策制定者提供参考,Ang 等(2016)构建了一个包含跨期跨区域的空间 IDA 模型,并用来比较 1990—2010 年 10 国发电产生的碳排放强度,进一步扩大了 IDA 法的应用范围。

(3)融入其他模型拓展 IDA 法的分析框架。刘博文等(2018)在 LMDI 分解法框架中融入了 Tapio 脱钩指数^①,对 1996—2015 年中国碳排放的脱钩弹性和脱钩努力程度从全国和地区层面进行了分析。其测算结果表明,中国在“九五”、“十一五”和“十二五”期间呈现弱脱钩状态,而各地区均做出了脱钩努力,其中北京脱钩努力最大,宁夏和青海脱钩努力最小。胡振等(2018)构建了一个 IPAT-LMDI 扩大模型,涵盖了家庭规模、住宅利用率、经济发展水平、碳排放率、能源消费结构和能源消耗强度等多个因素,对日本家庭碳排放的变化规律进行了分析。其发现碳排放率、能源消费结构和经济发展水平是推动日本家庭碳排放上升的主要因素,而住宅利用率、家庭规模和能源消耗强度是抑制因素,这表明优化家庭能源结构、合理控制住宅增速和节能标准,将有助于实现碳减排。

四、结构分解分析评价

SDA 方法利用投入产出表,以消耗系数矩阵为基础,可对各影响因素如产业部门最终需求、国际贸易等进行较为细致的分析,其主要分析工具为投入产出法。早在 20 世纪 60 年代末期,投入产出分析就已被用于环境问题的研究中。进入 20 世纪 80 年代后,该法逐步成为研究能源排放分解的有力工具,得到了较为广泛的运用

^① Tapio 脱钩指标是一种弹性系数指标,该指标基于碳排放和经济产出的变化量之比,以弹性值范围来界定碳排放和经济发展的“脱钩”状态。

(Gould and Kulshreshtha, 1986)。投入产出分析是一种研究经济系统各个部分间表现为投入与产出的相互依存关系的经济数量方法。假定 $M = c(I - A)^{-1}$ ，其中 c 为 $1 \times n$ 阶矩阵，表示部门的生产要素投入； A 为 $n \times n$ 阶矩阵，表示当前消费需求，包括对国内产品与进口产品的需求； I 为单位矩阵。 $(I - A)^{-1}$ 即为“里昂惕夫逆矩阵” (Leontief Inverse) L 。

要素总量为 $C = My + C_d$ 。其中， y 为 $n \times 1$ 阶商品投入向量； C_d 为一标量，表示直接使用要素； My 表示所有投入中间使用的要素。

在 SDA 法研究中，需要将上述的排放总量 C 结构性地分解为对排放有影响的各种因素。Lenzen (2003) 设定 $C = cLy + C_d$ ，并将 L 分解为前向关联 f (表示消费者对排放的影响)、工业结构 S 及后向关联 b (表示厂商对排放的影响)。定义 $f = \sum_{i=1}^n L_{ij}$ ， $S = \frac{L}{\sum_{i=1}^n L_{ij}}$ ， $b = \sum_{j=1}^n L_{ij}$ ，从而将 L 分解为 $L = \sum_{i=1}^n L_{ij} \frac{L}{\sum_{i=1}^n L_{ij} \sum_{j=1}^n L_{ij}} \sum_{j=1}^n L_{ij}$ ，即 $L = fSb$ 。 y 也可被分解为 $y = uwYP + gZ$ 。其中， $n \times d$ 阶矩阵 u 表示 d 个种类下各个部分的最终需求与该类的总最终需求之比 ($u_{nd} = y_{nd}/y_d$)； d 阶向量 v 表示各个种类下的最终需求与总消费之比 ($v_d = y_d/Y$)； Y 表示总消费； P 表示人口数量； $1 \times n$ 阶向量 g 表示出口加成指数， $n \times 1$ 阶向量 Z 表示出口总量。直接排放 C_d 表示剩余排放，可被分解为 $C_d = c_{res}P$ ，其中， c_{res} 表示剩余情况下消耗的每单位资本投入所产生的温室气体排放。综上可得： $C = cfSb(uwYP + gZ) + c_{res}P$ 。借鉴 Divisia 分解法中的微分思想，可将排放变化分解为：

$$\begin{aligned} \Delta C = & \Delta cfSb(uwYP + gZ) + c\Delta fSb(uwYP + gZ) + cf\Delta Sb(uwYP + gZ) + cfS\Delta b(uwYP + gZ) \\ & + cfSb(\Delta uwYP) + cfSb(u\Delta vYP) + cfSb(uv\Delta YP) + cfSb(\Delta gZ) \\ & + cfSb(g\Delta Z) + \Delta c_{res}P + (cfSbuwY + \Delta c_{res})\Delta P \end{aligned} \quad (9)$$

借此，可计算出各因素对排放波动的影响。

SDA 法特别适合于研究碳排放增长的分行业或部门影响因素。Chang 等 (2008) 利用基于投入产出的 SDA 法全面评价了中国台湾地区 1989—2004 年工业领域的二氧化碳排放。其将二氧化碳排放变化分解成 9 个指数的贡献，分别检验了 1989—1994 年、1994—1999 年及 1999—2004 年导致二氧化碳排放波动的主要影响因素。Wood (2009) 利用 SDA 法研究了近 30 年内澳大利亚温室气体排放情况。其将温室气体排放变化分解为 11 个影响因素，发现关键部门与工业结构的变化对温室气体排放波动的影响程度最大。近年来，SDA 法被广泛用于研究家庭消费、政府购买、固定资产投资、库存投资、国际贸易等最终需求部门对碳排放的影响，尤其是国际贸易已成为 SDA 法使用最热门的领域。Hoekstra 等 (2016) 估计了一国因进口他国碳减排技术更好的产品来替代本国产品所需的成本；通过使用 SDA 法，发现 1995—2007 年这种进口替代显著降低了高收入国家的碳排放，但增加了低收入国家的碳排放。总体而言，这种进口替代对全球碳排放增长的贡献率达到 18%。此外，横截面 SDA 法近年来也得到发展，被应用于跨区域比较与横截面数据分析等方面。Su 和 Ang

(2016) 提出了空间 SDA 法的分析框架来进行跨区域比较, 考察了中国 30 个地区的碳排放情况, 并对其碳排放绩效进行了排名。一些学者还将多区域投入产出表以及 GTAP 模型纳入 SDA 法的分析框架中, 通过涵盖更多数据和更细致的模型, 能够挖掘出影响不同国家碳排放的深层次原因 (Dietzenbacher et al., 2013; Arto et al., 2014)。

五、结论

本文介绍了目前较为常用的几种分解方式, 并进行相关比较。综合看来, IDA 类分解方法易于分解含有较少因素的模型, 并适合处理时间序列数据, 进行跨国比较。其中, LMDI I 分解法与修正的 Laspeyres 分解法凭借无残差、易使用等优点得到较为广泛的运用。SDA 分解法则可用于进行更为系统的分析, 分解较多因素对排放量的影响; 但这类方法对数据收集有较高的要求。SDA 分解法与 IDA 分解法最大的区别在于前者基于投入产出系统, 而后者则只需使用部门加总数据。通过对这两类方法在使用条件与使用方法上进行比较, 可发现相比于 IDA 法, SDA 法对数据有更高的要求, 这是其主要劣势。但 SDA 法的主要优势在于可凭借投入产出模型全面分析各种直接或间接的影响因素, 特别是某部门需求变动给其他部门带来的间接影响。而这是 IDA 法所不具备的 (Hoekstra and van der Bergh, 2003)。

目前, 关于碳排放的各种分解方法仍在不断发展中。除了 IDA 类与 SDA 类分解方法外, 一些新的方法开始涌现。如 Wang (2007) 利用生产理论中的 Shephard 产出距离函数将能源生产率分解为五部分; Zhou 和 Ang (2008) 使用 Shephard 产出距离函数与环境数据包络分析将二氧化碳排放分解为七个因素等。然而, 各方法之间并非完全独立, 分解的结果之间存在一些直接或间接的联系。Ang 等 (2009)、Hoekstra 和 van der Bergh (2003) 分别对 IDA 类分解方法下的各方法之间、SDA 分解法与 IDA 分解法之间的联系进行了研究与梳理。各方法之间的关联与融通将会是今后研究中的重点方向。

参考文献

- 崔盼盼、张艳平、张丽君等 (2018): 《中国省域隐含碳排放及其驱动机理时空演变分析》, 《自然资源学报》第 5 期, 第 879 ~ 892 页。
- 范建双、周琳 (2019): 《城镇化及房地产投资对中国碳排放的影响机制及效应研究》, 《地理科学》第 4 期, 第 644 ~ 653 页。
- 胡振、何晶晶、王玥 (2018): 《基于 IPAT-LMDI 扩展模型的日本家庭碳排放因素分析及启示》, 《资源科学》第 9 期, 第 1831 ~ 1842 页。
- 李波、刘雪琪、梅倩等 (2018): 《湖北省农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异》, 《中国人口·资源与环境》第 10 期, 第 62 ~ 70 页。
- 刘博文、张贤、杨琳 (2018): 《基于 LMDI 的区域产业碳排放脱钩努力研究》, 《中国人口·

资源与环境》第4期,第78~86页。

赵玉焕、孔翠婷、李浩(2018):《行业异质性视角下中国碳排放影响因素研究》,《中国能源》第3期,第22~31页。

Albrecht, J., D. Francois and K. Schoors (2002), "A Shapley Decomposition of Carbon Emissions without Residuals", *Energy Policy*, 30 (9), pp. 727 - 736.

Ang, B. W. (2004), "Decomposition Analysis for Policymaking in Energy: Which Is the Preferred Method?", *Energy Policy*, 32 (9), pp. 1131 - 1139.

Ang, B. W. and F. L. Liu (2001), "A New Energy Decomposition Method: Perfect in Decomposition and Consistent in Aggregation", *Energy*, 26 (6), pp. 537 - 548.

Ang, B. W. and K. H. Choi (1997), "Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: A Refined Divisia Index Method", *The Energy Journal*, 18 (3), pp. 59 - 73.

Ang, B. W. and N. Liu (2007), "Handling Zero Values in the Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition Approach", *Energy Policy*, 35 (1), pp. 238 - 246.

Ang, B. W., B. Su and H. Wang (2016), "A Spatial-Temporal Decomposition Approach to Performance Assessment in Energy and Emissions", *Energy Economics*, 60, pp. 112 - 121.

Ang, B. W., F. Q. Zhang and K. H. Choi (1998), "Factorizing Changes in Energy and Environmental Indicators through Decomposition", *Energy*, 23 (6), pp. 489 - 495.

Ang, B. W., H. C. Huang and A. R. Mu (2009), "Properties and Linkages of Some Index Decomposition Analysis Methods", *Energy Policy*, 37 (11), pp. 4624 - 4632.

Ang, B. W., F. L. Liu, and H. S. Chung (2004), "A Generalized Fisher Index Approach to Energy Decomposition Analysis", *Energy Economics*, 26 (5), pp. 757 - 763.

Arto, I., J. M. Rueda-Cantuche and G. P. Peters (2014), "Comparing the GTAP-MRIO and WIOD Databases for Carbon Footprint Analysis", *Economic Systems Research*, 26 (3), pp. 327 - 353.

Boyd, G., J. F. McDonald and M. Ross, et al. (1987), "Separating the Changing Composition of US Manufacturing Production from Energy Efficiency Improvement: A Divisia Index Approach", *Energy Journal*, 8 (2), pp. 77 - 96.

Boyd, G. A., D. A. Hanson, and T. Sterner (1988), "Decomposition of Changes in Energy Intensity—A Comparison of the Divisia Index and Other Methods", *Energy Economics*, 10 (4), pp. 309 - 912.

Chang, Y. F., C. Lewis and S. J. Lin (2008), "Comprehensive Evaluation of Industrial CO₂ Emission (1989 - 2004) in Taiwan by Input-Output Structural Decomposition", *Energy Policy*, 36 (7), pp. 2471 - 2480.

Choi, K. H. and B. W. Ang (2012), "Attribution of Changes in Divisia Real Energy Intensity Index—An Extension to Index Decomposition Analysis", *Energy Economics*, 34 (1), pp. 171 - 176.

Dietzenbacher, E., B. Los and R. Stehrer, et al. (2013), "The Construction of World Input-Output Tables in the WIOD Project", *Economic Systems Research*, 25 (1), pp. 71 - 98.

Ehrlich, P. R. and J. P. Holdren (1970), "The People Problem", *Saturday Review*, 4, pp. 42 - 43.

Fisher, I. (1922), *The Making of Index Numbers*, Boston: Houghton Mifflin.

González, F. P. (2015), "Exploring Energy Efficiency in Several European Countries: An Attribution Analysis of the Divisia Structural Change Index", *Applied Energy*, 137, pp. 364 - 374.

- Gould, B. W. and S. N. Kulshreshtha (1986), "An Interindustry Analysis of Structural Change and Energy Use Linkages in the Saskatchewan Economy", *Energy Economics*, 8 (3), pp. 186 – 196.
- Hatzigeorgiou, E., H. Polatidis and D. Haralambopoulos (2008), "CO₂ Emissions in Greece for 1990 – 2002: A Decomposition Analysis and Comparison of Results Using the Arithmetic Mean Divisia Index and Logarithmic Mean Divisia Index Techniques", *Energy*, 33 (3), pp. 492 – 499.
- Hoekstra, R. and J. van den Bergh (2003), "Comparing Structural and Index Decomposition Analysis", *Energy Economics*, 25 (1), pp. 39 – 64.
- Hoekstra, R., B. Michel and S. Suh (2016), "The Emission Cost of International Sourcing: Using Structural Decomposition Analysis to Calculate the Contribution of International Sourcing to CO₂-Emission Growth", *Economic Systems Research*, 28 (2), pp. 151 – 167.
- Jenne, C. A. and R. K. Cattell (1983), "Structural Change and Energy Efficiency in Industry", *Energy Economics*, 5 (2), pp. 114 – 123.
- Kaya, Y. (1989), *Impact of Carbon Dioxide Emission on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios*, Paris: IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group.
- Lee, K. and W. Oh (2006), "Analysis of CO₂ Emissions in APEC Countries: A Time-Series and A Cross-Sectional Decomposition Using the Log Mean Divisia Method", *Energy Policy*, 34, pp. 2779 – 2787.
- Lenzen, M. (2003), "Environmentally Important Linkages and Key Sectors in the Australian Economy", *Structural Change and Economic Dynamics*, 14 (1), pp. 1 – 34.
- Liu, F. L. and B. W. Ang (2003), "Eight Methods for Decomposing the Aggregate Energy Intensity of Industry", *Applied Energy*, 76 (1–3), pp. 15 – 23.
- Liu, Z., S. Liang and Y. Geng, et al. (2012), "Features, Trajectories and Driving Forces for Energy-Related GHG Emissions from Chinese Mega Cities", *Energy*, 37 (1), pp. 245 – 254.
- Löschel, A., F. Pöthen and M. Schymura (2015), "Peeling the Onion: Analyzing Aggregate, National and Sectoral Energy Intensity in the European Union", *Energy Economics*, 52, pp. 63 – 75.
- Ma, C. B. and D. Stern (2008), "Biomass and China's Carbon Emissions: A Missing Piece of Carbon Decomposition", *Energy Policy*, 36 (7), pp. 2517 – 2526.
- Paul, S. and R. N. Bhattacharya (2004), "CO₂ Emission from Energy Use in India: A Decomposition Analysis", *Energy Policy*, 32 (5), pp. 585 – 593.
- Shapley, L. S. (1953), *A Value for N-Person Games, in Contributions to the Theory of Games II*, Princeton: Princeton University Press.
- Su, B. and B. W. Ang (2016), "Multi-region Comparisons of Emission Performance: The Structural Decomposition Analysis Approach", *Ecological Indicators*, 67, pp. 78 – 87.
- Sun, J. W. (1998), "Changes in Energy Consumption and Energy Intensity: A Complete Decomposition Model", *Energy Economics*, 20 (1), pp. 85 – 100.
- Waggoner, P. E. and J. H. Ausubel (2002), "A Framework for Sustainability Science: A Renovated IPAT Identity", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99 (12), pp. 7860 – 7865.
- Wang, C. (2007), "Decomposing Energy Productivity Change: A Distance Function Approach", *Energy*, 32 (8), pp. 1326 – 1333.
- Wood, R. (2009), "Structural Decomposition Analysis of Australia's Greenhouse Gas Emissions",

Energy Policy ,37 (11) , pp. 4943 – 4948.

York ,R. , E. A. Rosa and T. Dietz (2002) , “Bridging Environmental Science with Environmental Policy: Plasticity of Population , Affluence and Technology” , *Social Science Quarterly* , 83 (1) , pp. 18 – 34.

Zhang , F. Q. and B. W. Ang (2001) , “Methodological Issues in Cross-Country Region Decomposition of Energy and Environmental Indicators” , *Energy Economics* , 23 (2) , pp. 179 – 190.

Zhang , M. , H. Mu and Y. Ning , et al. (2009) , “Decomposition of Energy-related CO₂ Emission over 1991 – 2006 in China” , *Ecological Economics* , 68 (7) , pp. 2122 – 2128.

Zhou , P. and B. W. Ang (2008) , “Decomposition of Aggregate CO₂ Emissions: A Production-Theoretical Approach” , *Energy Economics* , 30 (3) , pp. 1054 – 1067.

Decomposition of Carbon Emissions: Theoretical Basis , Path Analysis and Selection Evaluation

Qu Shen-ning

(Institute of Industrial Economics , Chinese Academy of Social Sciences , Beijing 100836 , China)

Abstract: The decomposition of Carbon emissions which makes up the analytical framework for studying the changing characteristics of Carbon emissions , has been applied more and more in environmental economics research gradually. In this paper , several decomposition methods are introduced and compared. IDA (Index Decomposition Analysis) methods usually use energy identities to represent carbon emissions , and decompose them according to different weighting methods to determine the share of each factor. IDA methods are easier to decompose models with few factors , and more suitable for processing time series data and making cross-country comparisons , which include Laspeyres index decomposition and Divisia index decomposition. LMDI I method is widely used because of no residuals. SDA (Structural Decomposition Analysis) method can conduct more systematic analysis and decompose many factors from carbon emissions , but it has more requirements for data collection. The biggest difference between SDA method and IDA method is that the former is based on input-output system , while the latter only needs sectoral data.

Key Words: carbon emissions; IDA; SDA; LMDI I

责任编辑: 张莹