

DOI:10.13216/j.cnki.upcjess.2020.05.0001

能源与碳排放强度研究综述:基于乘性结构分解分析框架

闫俊娜¹, Su Bin², 李莹珠³

(1. 天津财经大学 商学院, 天津 300222; 2. 新加坡国立大学 能源研究所, 新加坡 119620;
3. 浙江大学 公共管理学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:在能源环境领域中,强度指标能够衡量能源利用与碳排放的相对效率,被广泛应用于国家节能减排目标和能源环境政策制定与实施中。乘性结构分解分析以投入-产出模型为基础,对导致强度指标变化/差异的影响因素进行系统的量化研究。近年来,乘性结构分解分析无论在应用还是方法论层面都有了较快的发展。对 2010—2019 年间将乘性结构分解分析方法用于能源碳排放指标的研究进行综述分析,发现:(1)研究数量呈现快速上升趋势;(2)研究问题呈现单区域向多区域拓展的特征;(3)非竞争型进口假设被越来越多地采纳;(4)大分解因素数量的研究逐渐增加;(5) D&L(或广义 Fisher 指数)方法仍然是乘性结构分解分析框架内最为常用的分解方法。在对乘性结构分解分析方法论发展进行评述的基础上,提炼未来发展需求和研究空白。

关键词:结构分解分析;乘性分解;强度指标;能源碳排放领域;中国

中图分类号:X24;F426.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-5595(2020)05-0001-10

一、引言

由于全球性气候变化,与人类活动相关的能源利用与 CO₂ 排放得到了国内外研究学者的广泛关注。^[1]作为经济活动的重要保障,能源消耗及其 CO₂ 排放的控制与管理需要多维度的系统研究,加强节能减排是实现可持续发展的重要组成部分。^[2,3]针对不同国家和地区,依据经济、技术、人口等发展现状的不同,制定有区别的节能减排目标及政策措施。^[4,6,7]针对同一国家或地区,受经济发展、技术进步、区域间合作等影响,能源利用及碳排放特征会发生变化,节能减排目标与政策制定也会随之调整。^[8]

绝对指标和强度指标常被用来定义和衡量国

家、地区或行业层面的能源及环境表现。具体而言,能源消费^[9]、CO₂ 排放量^[10]等绝对指标和能源强度^[9]、CO₂ 排放强度^[12]等强度指标被广泛应用于不同层面的能源及环境研究。与绝对指标相比,强度指标通常被定义为单位经济产出的能源消耗或 CO₂ 排放量,体现了相对效率的含义。在多区域对比分析中,由于经济体量、人口规模、发展速度等因素的差异,绝对指标不具备直接可比性。然而,强度指标能够剔除上述因素的影响,直接对区域间能源利用和 CO₂ 排放效率差异进行对比研究。^[13]近年来,强度指标也逐渐被发展中国家用于节能减排目标规划中。2015 年,中国在“国家自主贡献”中提出:到 2030 年单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2005 年下降

收稿日期: 2020-06-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(71804121,71834003);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目
作者简介: 闫俊娜(1988—),女,天津人,天津财经大学商学院讲师,博士,研究方向为能源环境政策与管理;李莹珠(1986—),女,四川自贡人,浙江大学公共管理学院百人计划研究员,博士生导师,研究方向为能源环境系统建模、减少和适应气候变化。
通信作者: Su Bin(苏斌,1982—),男,福建龙岩人,新加坡国立大学能源研究所高级研究员,博士生导师,研究方向为能源和环境经济与政策、能源环境系统建模和分析。E-mail:subin@nus.edu.sg。

60%~65%^[14];印度也采用碳排放强度指标制定本国的自主贡献目标。

分解分析能够对某一/多个研究对象的能源或环境表现的变化/差异进行定量研究,量化不同影响因素对能源或环境指标变化/差异的贡献程度。^[15]目前,有两种比较流行的分解分析方法,即指数分解分析(Index Decomposition Analysis, IDA)和结构分解分析(Structural Decomposition Analysis, SDA)。这两种方法既有区别又有联系。从数学模型的角度出发,SDA 可以看作是 IDA 的一般化。^[16]具体地说,IDA 能够对产业层面能源及环境指标的变化/差异进行逐年分解分析,即能够实现链式分解;SDA 以投入-产出(Input-Output)模型为基础,从部门关联的角度出发,能够探究导致国家或地区层面能源及环境指标产生变化/差异的直接和间接影响因素。在方法论发展和模型应用方面,关于两种分解方法的详细比较和评述可以参考 Hoekstra 等^[17]、Su 等^[18]、Wang 等^[19]的文献。与 IDA 相比,SDA 具有较高的数据要求和模型复杂度,能够系统地进行分解研究,特别是对于结构性因素的探究,例如生产结构效应、最终需求结构效应等。关于 IDA 在能源环境领域的综述研究可以参考 Ang^[20]的文献。本文将重点关注 SDA 在能源碳排放领域的发展与应用。

按照分解方式,结构分解分析可以分为加性分解和乘性分解。从指标分解和结果解释的角度,加性分解适用于绝对指标,乘性分解更适用于强度指标。2010 年以前,绝大多数的能源及环境研究都是采用加性 SDA 方法,具体可参考 Su 等^[18]的文献。由于加性 SDA 方法易于操作,能够直接得到整体层面及部门层面的分解结果,近年来仍广泛应用于绝对指标的分解研究,例如 Ninpanit 等^[21]、Wang 等^[22]对国家层面总体/隐含 CO₂ 排放的变化研究, Lan 等^[23]、He 等^[24]、Zhao 等^[25]对全球、国家及省份层面能源消耗的变化研究。伴随 SDA 方法论的发展,乘性 SDA 方法自 2010 年开始应用于能源环境领域。近年来,由于强度指标越来越多地应用于国家/地方层面的节能减排目标设定及能源环境政策制定,乘性 SDA 的应用也不断增加。Su 等^[26]将基于广义 Fisher 指数分解的归因分析应用于结构分解分析框架中,在方法论层面解决了通过乘性分解方式得到部门层面分解结果的问题。在 Leontief 投入-产出框架下,Wang 等^[27]探索了加性 SDA 和乘性 SDA 的关联,进一步为乘性 SDA 在能源环境领域的应用夯实理论基础。

鉴于近年来乘性 SDA 在方法和应用层面都有

较快的发展,本文分别从模型构建、实证研究、方法论发展三个方面对乘性 SDA 进行综述研究。主要贡献有:(1)分别基于竞争型和非竞争型进口假设,构建乘性 SDA 方法整体及部门层面基本分解模型;(2)针对能源碳排放领域 2010—2019 年采用乘性 SDA 方法的国内外实证研究,从研究特征、研究趋势、指标构建、模型应用等方面进行综述;(3)从方法论的角度,对研究期内乘性 SDA 方法的发展进行评述,并凝练未来方法论发展需求和研究空白,为乘性 SDA 方法的广泛应用提出针对性建议。

二、强度指标乘性结构分解分析基本模型

结构分解分析以投入-产出模型为基础,对国家及地区层面的能源及环境指标进行因素分解。在模型构建过程中,不同的研究假设组合,如投入-产出模型种类^[28]、进口类型^[29]、部门整合^[30]、时间整合^[31]、空间整合^[32]等,会导致不同的研究结果。不失一般性,本文在 Leontief 投入-产出模型框架下分别基于竞争型和非竞争型进口假设构建乘性结构分解分析模型。此外,本文使用增加值合计来定义能源与碳排放强度指标,能够避免重复核算的问题^[33]。

(一)能源/碳排放 Leontief 投入-产出分析

基于竞争型进口假设,标准的 Leontief 投入-产出模型可以表示为

$$\mathbf{x} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{1} + \mathbf{y} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{y} = \mathbf{L} \mathbf{y} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为总产出向量; $\mathbf{Z}$ 为中间投入矩阵; $\mathbf{y} = \mathbf{y}_f + \mathbf{y}_e - \mathbf{y}_m$ 为总最终需求向量, $\mathbf{y}_f$ 为总最终消费向量, $\mathbf{y}_e$ 为出口向量, $\mathbf{y}_m$ 为进口向量; $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 为总 Leontief 逆矩阵; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

通过直接能源/碳排放强度向量 $\mathbf{f}_E$,即单位增加值合计直接能源消耗量/CO₂ 排放量,可以得到

$$E^c = \mathbf{f}'_E \mathbf{v} = \mathbf{f}'_E (\hat{\mathbf{k}} \mathbf{x}) = \mathbf{f}'_E (\hat{\mathbf{k}} \mathbf{L} \mathbf{y}) = \mathbf{f}'_E \mathbf{H} \mathbf{y} \quad (2)$$

式中: E^c 表示竞争型进口假设下总能源消耗/CO₂ 排放量; $\mathbf{v}$ 为增加值合计向量, $\mathbf{k} = (\hat{\mathbf{x}})^{-1} \mathbf{v}$ 为初始投入系数向量, $\mathbf{H} = \hat{\mathbf{k}} \mathbf{L}$ 为总增加值合计需求系数矩阵。

在竞争型进口假设的投入-产出框架下,使用支出法来计算 GDP。

$$\text{GDP}^c = \mathbf{1}' \mathbf{y} \quad (3)$$

因此,总能源/CO₂ 排放强度可以表示为

$$\text{EI}^c = \frac{E^c}{\text{GDP}^c} = \frac{\mathbf{f}'_E \mathbf{H} \mathbf{y}}{\mathbf{1}' \mathbf{y}} = \mathbf{f}'_E \mathbf{H} \mathbf{y}_{\text{str}}^c \quad (4)$$

式中: $\mathbf{y}_{\text{str}}^c = \frac{\mathbf{y}}{(\mathbf{1}' \mathbf{y})}$ 为总最终需求结构向量。

基于非竞争型进口假设,标准的 Leontief 投入-

产出模型可以表示为

$$\mathbf{x} = \mathbf{Z}_d \cdot \mathbf{1} + \mathbf{y}_d = (\mathbf{I} - \mathbf{A}_d)^{-1} \mathbf{y}_d = \mathbf{L}_d \mathbf{y}_d \quad (5)$$

式中: $\mathbf{Z}_d$ 为国内中间投入矩阵; $\mathbf{y}_d = \mathbf{y}_{df} + \mathbf{y}_e$ 为国内最终需求向量, $\mathbf{y}_{df}$ 为国内最终消费向量; $\mathbf{A}_d = \mathbf{Z}_d(\hat{\mathbf{x}})^{-1}$ 为国内生产技术系数矩阵; $\mathbf{L}_d = (\mathbf{I} - \mathbf{A}_d)^{-1}$ 为国内 Leontief 逆矩阵。

类似地,通过直接能源/碳排放强度向量 $\mathbf{f}_E$,可以得到

$$\mathbf{E}^{nc} = \mathbf{f}'_E \mathbf{v} = \mathbf{f}'_E(\hat{\mathbf{k}}\mathbf{x}) = \mathbf{f}'_E(\hat{\mathbf{k}}\mathbf{L}_d\mathbf{y}_d) = \mathbf{f}'_E \mathbf{H}_d \mathbf{y}_d \quad (6)$$

式中: $\mathbf{E}^{nc}$ 表示非竞争型进口假设下总能源消耗/CO₂ 排放量, $\mathbf{H}_d = \hat{\mathbf{k}}\mathbf{L}_d$ 为国内增加值合计需求系数矩阵。

在非竞争型进口假设的投入-产出框架下,使用生产法来计算 GDP。

$$\text{GDP}^{nc} = \mathbf{1}'\mathbf{v} = \mathbf{1}'(\hat{\mathbf{k}}\mathbf{x}) = \mathbf{1}'(\hat{\mathbf{k}}\mathbf{L}_d\mathbf{y}_d) = \mathbf{1}'\mathbf{H}_d\mathbf{y}_d \quad (7)$$

因此,总能源/CO₂ 排放强度可以表示为

$$\text{EI}^{nc} = \frac{\mathbf{E}^{nc}}{\text{GDP}^{nc}} = \frac{\mathbf{f}'_E \mathbf{H}_d \mathbf{y}_d}{\mathbf{1}'\mathbf{H}_d \mathbf{y}_d} = \frac{\mathbf{f}'_E \mathbf{H}_d \mathbf{y}_{str}^{nc}}{\mathbf{1}'\mathbf{H}_d \mathbf{y}_{str}^{nc}} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{y}_{str}^{nc} = \frac{\mathbf{y}_d}{(\mathbf{1}'\mathbf{y}_d)}$ 为国内最终需求结构向量。

本节以单区域 Leontief 模型为例,对能源/碳排放强度指标进行投入-产出分析。类似的能源/碳排放投入-产出分析,也可基于多区域投入-产出模型。不同的是,多区域投入-产出模型框架下,指标和模型构建会更加复杂,例如进口假设(包含国际进口和省际进口)、研究层面等更加多样化。

(二) 能源/碳排放强度指标乘性结构分解分析

在竞争型进口假设的投入-产出模型内,研究期($i \sim j$)内总能源/CO₂ 排放强度的变化,或在某一固定年份区域间($i \sim j$)总能源/CO₂ 排放强度的差异,可以基于公式(4)通过乘性分解得到。

$$D_{\text{tot, EI}}^c = \frac{\text{EI}_j^c}{\text{EI}_i^c} = D_{f_E}^c D_H^c D_{y_{str}}^c \quad (9)$$

式中: $D_{f_E}^c$ 为能源/CO₂ 排放强度效应, D_H^c 为 Leontief 结构效应, $D_{y_{str}}^c$ 为总最终需求结构效应。

在非竞争型进口假设的投入-产出模型内,强度指标的表达式为分式形式。参考公式(8),类似的乘性分解基本模型可以表述为

$$D_{\text{tot, EI}}^{nc} = \frac{D_{\text{tot, E}}^{nc}}{D_{\text{tot, GDP}}^{nc}} = \frac{D_{E, f_E}^{nc} D_{E, H_d}^{nc} D_{E, y_{str}}^{nc}}{D_{\text{GDP}, H_d}^{nc} D_{\text{GDP}, y_{str}}^{nc}} =$$

$$D_{E, f_E}^{nc} \left(\frac{D_{E, H_d}^{nc}}{D_{\text{GDP}, H_d}^{nc}} \right) \left(\frac{D_{E, y_{str}}^{nc}}{D_{\text{GDP}, y_{str}}^{nc}} \right) = D_{f_E}^{nc} D_{H_d}^{nc} D_{y_{str}}^{nc} \quad (10)$$

式中: $D_{f_E}^{nc}$ 为能源/CO₂ 排放强度效应, $D_{H_d}^{nc}$ 为国内 Le-

ontief 结构效应, $D_{y_{str}}^{nc}$ 为国内最终需求结构效应。

将广义 Fisher 指数的归因分析^[26]引入乘性 SDA 模型内,公式(9)~(10)中的各效应可以进一步分解到部门层面。假设 $D_{f_E}^c$ 和 $D_{f_E}^{nc}$ 为能源强度效应。

$$D_{f_E}^c = \prod_{k=1}^n \left(\frac{f_{E,k}^c}{f_{E,k}^c} \right)^{w_k^c} = \prod_{k=1}^n D_{f_E,k}^c, \quad \sum_{k=1}^n w_k^c = 1 \quad (11)$$

$$D_{f_E}^{nc} = \prod_{k=1}^n \left(\frac{f_{E,k}^{nc}}{f_{E,k}^{nc}} \right)^{w_k^{nc}} = \prod_{k=1}^n D_{f_E,k}^{nc}, \quad \sum_{k=1}^n w_k^{nc} = 1 \quad (12)$$

式中: $f_{E,k}^*$ 为不同时期或区域 k 部门的直接能源强度; $D_{f_E,k}^*$ 为竞争型或非竞争型进口假设下 k 部门的能源强度效应; w_k^* 为 k 部门的权重系数,用于衡量单位直接能源强度的变化/差异对总能源强度变化效应的相对贡献。

在乘性结构分解分析框架下,用于计算公式(9)~(10)中各效应值的常见分解方法有 ad hoc、D&L 方法^[34]、对数平均迪式指数法(LMDI)^[35-36]。具体的方法选择可以参考 Su 等^[18]、Wang 等^[27] 的文献。此外,继续对公式(9)~(10)中的 Leontief 结构效应进行二阶分解,可以对中间投入相关技术因素和替代因素进行深入分析。

三、能源碳排放领域乘性结构分解分析应用研究综述

乘性结构分解分析以投入-产出模型为基础,能够对与经济系统相关的能源/环境指标(特别是强度指标)的变化/差异进行不同层面(例如整体和部门)的分解分析,量化不同因素的影响程度,例如能源强度效应、生产结构效应、最终需求效应等,其分析框架如图 1 所示。

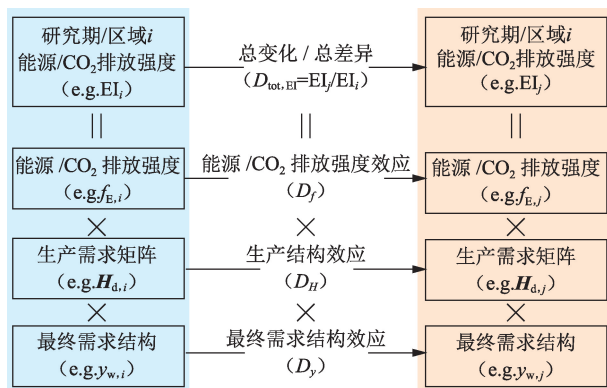


图 1 乘性结构分解分析研究框架

2010 年,乘性结构分解分析开始应用于能源环境领域。乘性 SDA 方法能够对结构性因素(例如能源投入结构、完全需求结构、最终需求结构等)进行

系统研究,具有结果易解释性和无量纲性的优势^[37],近年来得到了广泛应用。本文对 2010—2019 年乘性 SDA 在能源碳排放领域的应用研究进行综

述,从中英文数据库检索获取 26 篇相关文献。如表 1 所示,从研究、应用、指标、投入-产出模型和分解模型几个方面对文章进行归纳总结。

表 1 2010—2019 年间能源碳排放领域乘性结构分解分析研究及特征总结

研究		应用		指标		投入-产出模型				分解模型	
年份	作者	范围	时间	能源	碳排放	类型	单/多 区域	进口 假设	需求项 分解	因素 个数	分解 方法
2010	夏炎等 ^[38]	中国	1987—2005	I		L	S	C	N	5	Polar D&L
2011	付雪等 ^[39]	上海市	2002—2007		I	L	S	C	N	5	Polar D&L
2012	Fan 等 ^[40]	中国	1987—2007	I		L	S	C	N	6	Polar D&L
2012	Xia 等 ^[41]	中国	1987—2005	I		L	S	C	N	5	Polar D&L
2013	陈琳 ^[42]	中国	1997—2007		I	L	S	C	N	4	Polar D&L
2014	Zhang 等 ^[43]	中国	1987—2007	T/I		L	S	C	N	4/5	ad hoc
2014	Zhang 等 ^[44]	中国 7 区域	1987—2007	T		L	M	C	N	6	ad hoc
2015	Su 等 ^[37]	中国	2007—2010		I	L/G	S	C/NC	N	3/5	D&L
2015	Xia 等 ^[45]	中国	2007—2010	I		L	S	NC	Y	11	Polar D&L
2016	Su 等 ^[46]	中国 30 个省区	2002		I	L	S	C/NC	N	3	D&L
2017	Kaltenegger 等 ^[47]	全球 40 个主要经济体	1995—2030	T		L	M	C	N	11	LMDI
2017	Su 和 Ang ^[48]	中国	2007—2012		I	L	S	NC	Y	3	D&L
2017	Wang 等 ^[49]	全球 40 个主要经济体	2000—2009		I	L	M	NC	N	8	LMDI
2017	Wang 等 ^[19]	中国	2007—2012	T		L	M	NC	N	4	LMDI-I
2017	Wang 等 ^[27]	中国	2007—2012	I		L	S	C/NC	N	3	D&L; Polar D&L; LMDI-I
2017	李玲等 ^[50]	中国	1997—2012	I		L	S	C	N	5	Polar D&L
2017	张俊荣等 ^[51]	北京市	1997—2012	I		L	S	C	N	5	Polar D&L
2018	Morioka 等 ^[52]	日本	1990—2005		T	L	S	NC	N	6	D&L
2018	Yan 等 ^[28]	中国	2002—2012		I	L/G	S	NC	N	5/6	Polar D&L
2018	Zhu 等 ^[53]	印度	2007—2013		I	L	S	NC	Y	3	D&L
2019	Cao 等 ^[54]	中国及其 30 个省区	2007—2012		I	L	M	NC	Y	3	D&L
2019	Shironitta 等 ^[55]	40 个国家	1995—2008		I	L	S	NC	N	4	其他
2019	Su 等 ^[56]	中国	2007—2012		I	L	S	NC	Y	3	D&L
2019	Wang 等 ^[57]	中国	2002—2012		I	L	M	NC	N	10	LMDI-I
2019	Wang 等 ^[58]	美国—日本	2000—2011		T	L	M	C	N	6	LMDI
2019	Yang 等 ^[59]	中国 8 区域	1997—2007		T	L	M	NC	Y	14	ad hoc

注:T 表示绝对指标,I 表示强度指标,L 表示 Leontief 投入-产出模型,G 表示 Ghosh 投入-产出模型,M 表示多区域投入-产出模型,S 表示单区域投入-产出模型,C 表示竞争型进口假设,NC 表示非竞争型进口假设,Y 表示是,N 表示否。

根据研究特征及模型应用,本文将时间跨度划分为两个子时间段,即 2010—2014 年和 2015—2019 年,分别进行研究评述。在乘性 SDA 应用第一阶段(即 2010—2014 年),相关文献显示出分解能源指标多于碳排放指标,强度指标多于绝对指标的特征,其应用常见于探索中国的能源及 CO₂ 排放强度的变化情况。在研究范围方面,多涉及国家层面,仅有两篇文章涉及区域层面,即中国多区域能源消耗变化^[44]和上海市 CO₂ 排放强度下降的因素分解分析^[39]。这一阶段内的研究多基于混合投入-产出模型,以实物价值型能源投入-产出表为数据基础,在竞争型进口假设下对能源及碳排放指标进行系统研究。在第一阶段研究涵盖的 1987—2007 年期间,中国的经济发展主要由投资和出口拉动,相应的能源消耗及 CO₂ 排放呈现快速上升趋势。但中国的能

源强度和 CO₂ 排放强度整体呈现下降趋势(除了 2002—2005 年间的小幅反弹)。研究发现 1987—2007 年间导致能源及 CO₂ 排放强度变化的因素多为能源消耗效应、生产技术效应、最终需求结构效应以及最终需求水平效应。其中,能源消耗效应是最主要的抑制因素,生产技术效应和最终需求结构效应是主要的促进因素。

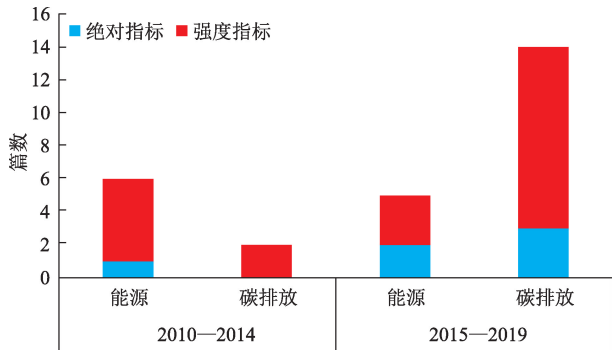
2015 年,Su 等^[37]在结构分解分析框架内提出了不同研究假设组合下(即投入-产出模型种类、国家进口假设以及 GDP 核算方式)应用乘性分解方式对强度指标进行研究的基本模型,并在乘性 SDA 框架内引入归因分析,将分解结果由整体层面延伸到部门层面,由此开启了研究范围更加完备的乘性 SDA 应用第二阶段(即 2015—2019 年)。得益于以多区域投入-产出模型为基础的乘性 SDA 方法发

展,第二阶段研究范围由中国向外扩展到全球 40 个主要经济体^[47,49,55],向内覆盖国内 30 个省(自治区、直辖市)^[46,54,59],涉及全球、国家、区域多个研究层面。与第一阶段不同,这一时期的研究多集中在碳排放领域,对 CO₂ 排放强度的分解分析显著增多。伴随着以消费观点为基础的能源/环境研究得到越来越多的认可^[60],关于国际贸易导致的能源消耗及其 CO₂ 排放也受到了越来越多的关注^[45,58],尤其在处理国家间进口产品与服务时,非竞争型进口假设成为这一时期的主流研究假设。从需求的角度出发,Su 等^[48]在传统的指标技术基础上提出了整体隐含强度(Aggregate Embodied Intensity, AEI)概念,将其定义为隐含能源/CO₂ 排放与隐含增加值合计的比值,用来系统研究最终需求种类(例如消费、投资、出口)相关的能源消耗/CO₂ 排放的相对效率。特别是整体隐含强度指标可以分别在整体、最终需求种类及部门层面进行定义和研究,具有完备性特征。

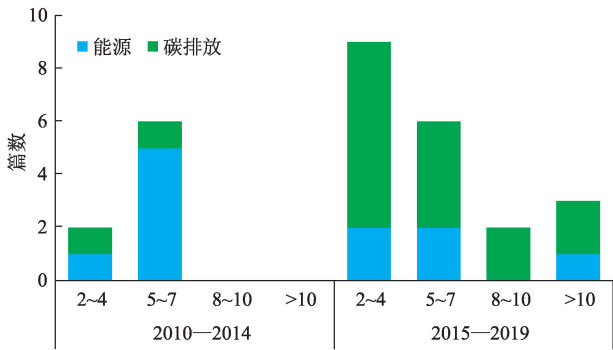
第二阶段研究的焦点仍然是中国的能源碳排放表现及变化。在研究涵盖的 2007—2012 年期间,中国的整体能源/CO₂ 排放强度呈现持续下降趋势。强度指标的变化常分解为排放系数效应、能源消费结构效应、能源强度效应、国内生产结构效应以及国内最终需求结构效应。其中,能源强度效应表现出最主要的抑制作用,同时国内生产结构和国内最终需求结构效应表现出主要的促进作用。这一时期,

在能源利用/碳排放效率显著提高的基础上,结构优化转型(特别是能源消费结构、生产结构和最终消费结构)是进一步挖掘节能减排潜力、持续改善能源环境表现的关键。在区域层面,Su 等^[46]将空间分解引入结构分解分析框架,用于评价区域能源/环境表现以及量化多区域能源/环境表现差异的影响因素及影响程度,并分别针对绝对指标和强度指标构建加性分解和乘性分解的基本模型。基于 2002、2012 年经济和能源数据,国内 30 个省(自治区、直辖市)间 CO₂ 排放强度存在较为显著的地区间差异^[46, 54],研究表明生产技术效应是北京-天津、沿海地区、中部地区 CO₂ 排放强度高于全国平均水平的主要因素,同时生产结构效应、最终需求效应是其他地区 CO₂ 排放强度低于全国平均水平的主要原因。

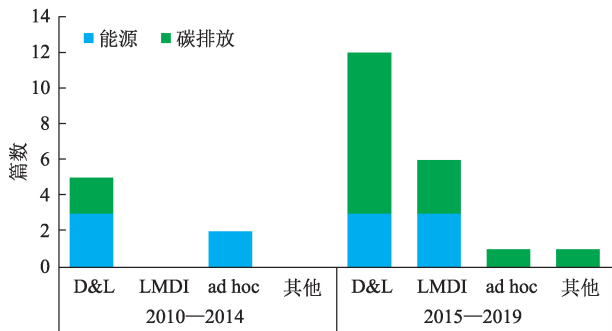
对比两个阶段里乘性 SDA 方法的应用研究,第二阶段总体研究数量显著增多。与能源指标相比,碳排放指标呈现出研究数量增长速度快且研究水平高的特征,特别是碳排放强度指标,如图 2(a)所示。对目标指标的分解分析整体表现为逐渐深入、细化的特征,分解因素的个数呈现出显著增加的趋势,特别是第二阶段包含 5 篇因素分解个数大于等于 8 的应用研究,如图 2(b)所示。在分解方法方面,第二阶段表现出更加丰富的分解方法选择与应用特征,如图 2(c)所示。在计算单个影响因素的影响程度时,D&L 方法(或广义 Fisher 指数)被广泛应用。同



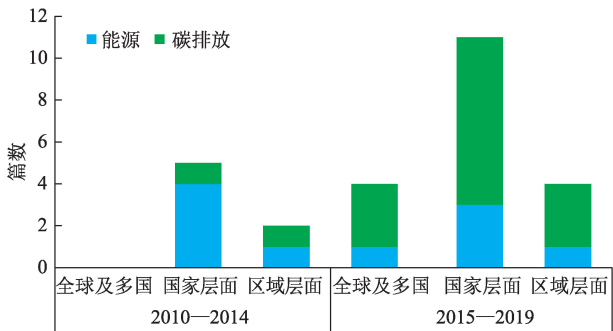
(a) 研究数量及时间范围



(b) 因素分解个数及时间范围



(c) 分解方法及时间范围



(d) 研究范围及时间范围

图 2 2010—2019 年间乘性结构分解分析方法应用研究特征总结

时,源于LMDI方法在指数分解分析(IDA)中的成功应用,其在乘性SDA方法应用第二阶段也得到了较好的发展。在研究范围方面,第二阶段相较于第一阶段研究范围更广泛,特别是扩展到全球及多国层面的能源碳排放指标的分解。并且,针对同一研究范围,第二阶段的应用研究也表现出更加丰富的研究数量,如图2(d)所示。除此之外,从时空维度出发,第一阶段的应用研究均为时间分解分析,第二阶段同时包含时间分解和空间分解分析。综上所述,2010—2019年间,在能源和碳排放领域乘性SDA方法在研究数量、研究范围、研究深度、模型发展、指标构建、研究结果等方面均得到了较为快速、有效的发展。这一方面源于全球对能源利用及气候变化问题的持续高度关注,特别是中国自主贡献目标的实现;另一方面则得益于乘性SDA方法论的发展。

四、乘性结构分解分析方法发展评述

2015年之前,乘性SDA方法多基于单区域投入-产出模型,采用竞争型进口假设从需求的角度出发进行模型构建,研究范围仅涉及单个国家和地区。2015年之后,特别是2019年,以多区域投入-产出模型为基础的乘性SDA方法得到了极大的发展,采用非竞争型进口假设对全球或主要经济体进行系统研究。与单区域模型相比,多区域投入-产出模型能够捕捉区域间经济关联,特别是区域间贸易和反馈效应,同时具有更复杂的研究假设、模型构建和数据基础。也因为难度高,乘性SDA方法在多区域投入-产出模型中的方法和应用发展滞后于在单区域模型中。针对同一研究指标,基于单区域和多区域投入-产出模型的乘性SDA方法可能会得到不同的研究结果^[49]。具体投入-产出模型种类的选择还需要综合考虑研究问题、研究对象、研究视角、数据基础等因素。

在乘性结构分解分析框架内,常见的分解方法有乘性D&L方法(包括Polar D&L)、LMDI方法、ad hoc等。2015年之前,分解方法仅涉及Polar D&L和ad hoc,二者属于精确分解研究,分解结果不含残差项。2015年以来,分解方法呈现多样化特征,其中应用较为广泛的有D&L方法和LMDI方法。乘性D&L方法是结构分解分析框架中使用最为普遍的分解方法,属于理想分解方法,分解结果不含残差项,通过因素反转测试,克服了精确分解中由于分解因素顺序变化对分解结果产生的不稳定性影响,即分解随意性问题^[18,34]。但值得注意的是,完全D&L方法的计算次数随因素分解个数的增加以指数方式

增加,因而在分解因素数量较多时存在计算量大的不足。为权衡计算复杂性和结果准确性,近似D&L方法,即Polar D&L方法,被提出将其分解结果作为近似理想分解结果,并得到了广泛的应用。LMDI方法自2009年开始应用于加性SDA框架内^[61],并于2017年开始应用于乘性SDA框架内^[47]。乘性LMDI方法属于完美分解方法,具有分解结果不含残差项、通过时间反转测试、能够处理0值以及易操作的优势,近年来在乘性SDA框架内得到了较快的发展和使用。在具体分解方法选择时,需综合考虑理论基础、适用性、使用简便性和结果易解释性^[62]几个方面,D&L方法和LMDI方法是较为理想的选择。特别是当分解因素数量较大时,建议采用Polar D&L或LMDI方法。

另外,以投入-产出模型为基础的SDA分为一阶分解和二阶分解,后者针对Leontief逆矩阵对中间投入相关技术因素和替代因素进行深入研究^[18,63]。目前,乘性SDA方法在能源碳排放领域的应用大多采用一阶分解,采用二阶分解的研究还十分匮乏。在加性SDA框架内,已有研究采用D&L和ad hoc方法进行二阶分解。但在乘性SDA框架内,仅有2篇研究采用二阶分解且分解方法均为ad hoc方法^[44,59]。因此,在方法论层面,将D&L和LMDI方法应用于二阶乘性SDA模型中是未来发展的重要需求。

从时空角度出发,结构分解分析可以划分为时间-SDA和空间-SDA。前者主要研究导致某一研究对象能源环境指标随时间发生变化的影响因素及其影响程度,基于不同研究假设组合下的时间分解基本模型可以参考Su等^[37]的文献;后者探索导致多个研究对象间某一时间能源环境指标地区间差异的影响因素和影响程度,基于不同进口假设的空间分解基本模型可以参考Su等^[46]的文献。在乘性SDA框架内,较空间分解而言,采用时间分解的研究更为丰富。得益于方法论的发展,乘性SDA方法已经能够兼顾时间及空间维度、整体及部门层面的完备研究。

在模型基础方面,结构分解分析可以分别以Leontief和Ghosh投入-产出模型为基础开展研究。前者从需求角度出发,以最终需求为外生变量;后者从供给角度出发,以初始投入为外生变量,两者既有区别又有联系。^[37,64]在乘性SDA框架下,Ghosh投入-产出模型作为Leontief模型的有益补充,逐渐被应用于能源环境领域。^[65]从方法论角度看,无论是Leontief还是Ghosh模型为基础的乘性SDA方法都

能够实现时间及空间维度、整体及部门层面、一阶及二阶分解的完备研究。但是,与 Leontief 投入-产出模型相比,Ghosh 模型为基础的乘性 SDA 方法目前还仅限于时间分解研究,例如 Su 等^[37]、Yan 等^[28]所进行的研究,空间维度中的应用还十分不足。

伴随国家间、区域间经济流动越发复杂与频繁,消费观点为基础的能源环境研究得到了专业人士越来越多的认可与采纳^[60],因而 Leontief 投入-产出模型在能源环境领域中得到了较好的发展和应用。在 Leontief 投入-产出框架下,Su 等^[48]提出了整体隐含强度(AEI)指标系统分析最终需求导致的能源利用或温室气体排放的相对效率。与传统从生产角度构建的整体强度指标不同,AEI 从需求角度出发进行指标构建,并且能够量化分析最终需求种类对整体强度指标的影响。在乘性 SDA 方法框架下,AEI 指标已经迅速应用于国家和区域层面的碳排放问题(例如 Zhu 等^[53]、Wang 等^[57]、Wang 等^[66]、Zhou 等^[67])及能源问题研究中(例如 Yan 等^[64])。

为扩展乘性 SDA 方法的研究层面,Su 等^[56]将结构路径分析(SPA)技术引入乘性 SDA 方法框架内,并结合 AEI 指标,探索部门间交易层面能源环境表现的变化及差异。目前,该类研究仅涉及时间分解,在空间分解领域的应用还十分匮乏。随着这一方法组合的提出,以单/多区域投入-产出模型为基础的乘性 SDA 在方法论层面已能兼顾全球、国家、区域以及行业间多个研究层面。

五、结语

由于具有全球性特征,能源及环境问题已经得到了国内外研究学者的普遍关注。强度指标能够衡量能源利用与 CO₂ 排放的相对效率,被越来越多地用于制定国家节能减排目标及能源环境政策制定与实施中。分解分析是对能源环境指标的变化/差异进行定量分析的常用技术。其中,以投入-产出模型为基础的结构分解分析(SDA)能够系统地研究导致能源/环境指标产生变化及差异的直接和间接因素,特别是结构性因素。从分解方式来看,SDA 可以分为加性分解和乘性分解。自 2000 年 SDA 方法开始应用于能源环境领域以来,加性分解因使用简便性首先得到了较多的应用与发展,相关方法论发展和研究综述可以参考 Su 等^[18]文献。但 2010 年之后,乘性 SDA 方法无论在方法论和应用层面都有较大的进展。因此,本文基于 Leontief 投入-产出模型,采用不同进口假设针对能源/碳排放强度指标构建乘性 SDA 基本模型,给出整体层面和部门层面分解的一般表达式以及可行的分解方法选择。对

2010—2019 年采用乘性 SDA 方法的应用研究关于研究对象、研究问题、研究范围、指标构建、模型特征等方面进行研究综述。基于此,对研究期内乘性 SDA 方法论发展进行评述,并总结提炼方法发展需求和研究空白。

在应用层面,乘性 SDA 方法被越来越多地应用于多区域碳排放研究中,尤其是在 CO₂ 排放强度指标(包含整体隐含排放强度)的研究中应用频率颇高。伴随数据可得性的日渐完善,尤其是城市级投入-产出数据的增加,乘性 SDA 方法在城市能源环境问题的研究中也会发挥重要作用。联合使用 Leontief 和 Ghosh 投入-产出模型,乘性 SDA 方法能够分别从需求和供给两个角度对不同范围的能源环境指标(特别是强度指标)进行系统研究。在方法论层面,在乘性 SDA 框架内实现部门的完美分解以及在二阶分解中使用 D&L 方法和 LMDI 方法得到分解因素数值是未来发展的重点需求。本文主要综述了乘性 SDA 方法对能源及碳排放指标的研究,基于方法的普适性,乘性 SDA 方法还可广泛应用于具体能源种类(例如煤炭、石油、天然气等)及其他温室气体、大气污染物、固体废弃物、水等其他能源环境指标的时间及空间维度分解研究。

参考文献:

- [1] IPCC. The Fifth Assessment Report [R]. United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [2] Saidi K, Omri A. The Impact of Renewable Energy on Carbon Emissions and Economic Growth in 15 Major Renewable Energy-consuming Countries [J]. Environmental Research, 2020, 186: 109567.
- [3] 宋杰颀,张凯新,曹子建. 中国经济增长、能源消费与碳排放动态分析[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2015,31(6):1-6.
- [4] Du H B, Liu D, Southworth F, et al. Pathways for Energy Conservation and Emissions Mitigation in Road Transport up to 2030: A Case Study of the Jing-Jin-Ji Area, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,162:882-893.
- [5] Chang C P, Dong M, Sui B, et al. Driving forces of Global Carbon Emissions: From Time-and Spatial-dynamic Perspectives [J]. Economic Modelling, 2019,77:70-80.
- [6] Ning Y D, Chen K K, Zhang B Y, et al. Energy Conservation and Emission Reduction Path Selection in China: A Simulation Based on Bi-Level Multi-objective Optimization Model [J]. Energy Policy, 2020,137:111116.
- [7] 宋杰颀,梁璐璐,朱丹平,等. 山东省地市碳排放效率测度、影响因素与提升对策[J]. 中国石油大学学报(社会科学版),2018,34(1):15-21.

- [8] Sarkodie S A, Adams S, Owusu P A, et al. Mitigating Degradation and Emissions in China: The Role of Environmental Sustainability, Human Capital and Renewable Energy [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719:137530.
- [9] Lin G, Jiang D, Fu J, et al. A Spatial Shift-share Decomposition of Energy Consumption Changes in China [J]. *Energy Policy*, 2019,135:111034.
- [10] 蔡礼辉,张朕,朱磊. 全球价值链嵌入与二氧化碳碳排放——来自中国工业面板数据的经验研究[J]. *国际贸易问题*,2020,4:86-104.
- [11] Li M, Gao Y, Liu S. China's Energy Intensity Change in 1997—2015: Non-vertical Adjusted Structural Decomposition Analysis Based on Input-output Tables [J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2020, 53: 222-236.
- [12] Dong F, Li J Y, Zhang S N, et al. Sensitivity Analysis and Spatial-temporal Heterogeneity of CO₂ Emission Intensity: Evidence from China [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019,150:104398.
- [13] Song C, Zhao T, Wang J. Spatial-temporal Analysis of China's Regional Carbon Intensity Based on ST-IDA from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238:117874.
- [14] UNFCCC. Intended National Determined Contributions (INDC) Submissions [EB/OL]. (2015-12-12) [2020-06-10]. <https://www4.unfccc.int/Sites/Submissions/indc/submission%20pages/submissions.aspx>.
- [15] Ang B W, Xu X Y, Su B. Multi-country Comparisons of Energy Performance: The Index Decomposition Analysis Approach [J]. *Energy Economics*, 2015,47:68-76.
- [16] Lenzen M. Structural Analyses of Energy Use and Carbon Emissions-an Overview [J]. *Economic Systems Research*, 2016,28(2):119-132.
- [17] Hoekstra R, Jeroen J C J M, van der Bergh. Comparing Structure and Index Decomposition Analysis [J]. *Energy Economics*, 2003,25(1):39-64.
- [18] Su B, Ang B W. Structural Decomposition Analysis Applied to Energy and Emissions: Some Methodological Developments [J]. *Energy Economics*, 2012, 34(1): 177-188.
- [19] Wang H, Ang B W, Su B. Assessing Drivers of Economy-wide Energy Use and Emissions: IDA Versus SDA [J]. *Energy Policy*, 2017,107:585-599.
- [20] Ang B W. LMDI Decomposition Approach: A Guide for Implementation [J]. *Energy Policy*, 2015,86:233-238.
- [21] Ninpanit P, Malik A, Wakiyama T, et al. Thailand's Energy-related Carbon Dioxide Emissions from Production-based and Consumption-based Perspectives [J]. *Energy Policy*, 2019,133:110877.
- [22] Wang S, Zhu X, Song D, et al. Drivers of CO₂ Emissions from Power Generation in China Based on Modified Structural Decomposition Analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,220:1143-1155.
- [23] Lan J, Malik A, Lenzen M, et al. A Structural Decomposition Analysis of Global Energy Footprints [J]. *Applied Energy*, 2016,163:436-451.
- [24] He H, Reynolds C J, Li L, et al. Assessing Net Energy Consumption of Australian Economy from 2004—05 to 2014—15: Environmentally-extended Input-output Analysis, Structural Decomposition Analysis, and Linkage Analysis [J]. *Applied Energy*, 2019,240:766-777.
- [25] Zhao N, Xu L, Malik A, et al. Inter-provincial Trade Driving Energy Consumption in China [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018,134:329-335.
- [26] Su B, Ang B W. Attribution of Changes in the Generalized Fisher Index with Application to Embodied Emission Studies [J]. *Energy*, 2014,69:778-786.
- [27] Wang H, Ang B W, Su B. Multiplicative Structural Decomposition Analysis of Energy and Emission Intensities: Some Methodological Issues [J]. *Energy*, 2017, 123: 47-63.
- [28] Yan J, Su B, Liu Y. Multiplicative Structural Decomposition and Attribution Analysis of Carbon Emission Intensity in China, 2002—2012 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,198:195-207.
- [29] Su B, Ang B W. Input-output Analysis of CO₂ Emissions Embodied in Trade: Competitive Versus Non-competitive Imports [J]. *Energy Policy*, 2013,56:83-87.
- [30] Su B, Huang H C, Ang B W, et al. Input-output Analysis of CO₂ Emissions Embodied in Trade: The Effects of Sector Aggregation [J]. *Energy Economics*, 2010, 32: 166-175.
- [31] Su B, Ang B W. Structural Decomposition Analysis Applied to Energy and Emissions: Aggregation Issues [J]. *Economic Systems Research*, 2012, 24(3): 299-317.
- [32] Su B, Ang B W. Input-output Analysis of CO₂ Emissions Embodied in Trade: The Effects of Spatial Aggregation [J]. *Ecological Economics*, 2010, 70: 10-18.
- [33] Wang Z, Wei S J. Tracing Value-added and Double Counting in Gross Exports [J]. *American Economic Review*, 2014, 104: 459-494.
- [34] Dietzenbacher E, Los B. Structural Decomposition Techniques: Sense and Sensitivity [J]. *Economic Systems Research*, 1998, 10(4): 307-324.
- [35] Ang B W, Choi K H. Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry: A Refined Divisia Index Method [J]. *The Energy Journal*, 1997, 18

- (3): 59-73.
- [36] Ang B W, Liu F L. A new Energy Decomposition Method: Perfect in Decomposition and Consistent in Aggregation [J]. *Energy*, 2001, 26(6): 537-548.
- [37] Su B, Ang B W. Multiplicative Decomposition of Aggregate Carbon Intensity Change Using Input-output Analysis [J]. *Applied Energy*, 2015, 154: 13-20.
- [38] 夏炎, 杨翠红, 陈锡康. 中国能源强度变化原因及投入结构的作用 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(3): 442-448.
- [39] 付雪, 王桂新, 魏涛远. 上海碳排放强度结构分解分析 [J]. *资源科学*, 2011, 33(11): 2124-2130.
- [40] Fan Y, Xia Y. Exploring Energy Consumption and Demand in China [J]. *Energy*, 2012, 40(1): 23-30.
- [41] Xia Y, Yang C, Chen X. Structural Decomposition Analysis on China's Energy Intensity Change for 1987—2005 [J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2012, 25(1): 156-166.
- [42] 陈琳. 中国能源消费碳排放变化的影响因素分析——基于投入产出模型 [J]. *中外能源*, 2013, 18: 17-22.
- [43] Zhang H, Lahr M L. Can the Carbonizing Dragon be Domesticated? Insights from a Decomposition of Energy Consumption and Intensity in China, 1987—2007 [J]. *Economic Systems Research*, 2014, 26(2): 119-140.
- [44] Zhang H, Lahr M L. China's Energy Consumption Change from 1987 to 2007: A Multi-regional Structural Decomposition Analysis [J]. *Energy Policy*, 2014, 67: 682-693.
- [45] Xia Y, Fan Y, Yang C. Assessing the Impact of Foreign Content in China's Exports on the Carbon Outsourcing Hypothesis [J]. *Applied Energy*, 2015, 150: 296-307.
- [46] Su B, Ang B W. Multi-region Comparisons of Emission Performance: The Structural Decomposition Analysis Approach [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 78-87.
- [47] Kaltenegger O, Löschel A, Pothén F. The Effect of Globalisation on Energy Footprints: Disentangling the Links of Global Value Chains [J]. *Energy Economics*, 2017, 68: 148-168.
- [48] Su B, Ang B W. Multiplicative Structural Decomposition Analysis of Aggregate Embodied Energy and Emission Intensities [J]. *Energy Economics*, 2017, 65: 137-147.
- [49] Wang H, Ang B W, Su B. A Multi-region Structural Decomposition Analysis of Global CO₂ Emission Intensity [J]. *Ecological Economics*, 2017, 142: 163-176.
- [50] 李玲, 张俊荣, 汤铃, 等. 我国能源强度变动的影响因素分析——基于SDA分解技术 [J]. *中国管理科学*, 2017, 25(9): 125-132.
- [51] 张俊荣, 汤铃, 李玲, 等. 基于结构分解的北京能源强度影响因素研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(5): 1201-1208.
- [52] Morioka R, Nansai K, Tsuda K. Role of Linkage Structures in Supply Chain for Managing Greenhouse Gas Emissions [J]. *Journal of Economic Structures*, 2018, 7: 7.
- [53] Zhu B, Su B, Li Y. Input-output and Structural Decomposition Analysis of India's Carbon Emissions and Intensity, 2007/08—2013/14 [J]. *Applied Energy*, 2018, 230: 1545-1556.
- [54] Cao Y, Zhao Y, Wang H, et al. Driving Forces of National and Regional Carbon Intensity Changes in China: Temporal and Spatial Multiplicative Structural Decomposition Analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 213: 1380-1410.
- [55] Shironitta K, Okamoto S, Kagawa S. Cross-country Analysis of Relationship Between Material Input Structures and Consumption-based CO₂ Emissions [J]. *Environmental Economics and Policy Studies*, 2019, 21: 533-554.
- [56] Su B, Ang B W, Li Y. Structural Path and Decomposition Analysis of Aggregate Embodied Energy and Emission Intensities [J]. *Energy Economics*, 2019, 83: 345-360.
- [57] Wang H, Pan C, Zhou P. Assessing the Role of Domestic Value Chains in China's CO₂ Emission Intensity: A Multi-region Structural Decomposition Analysis [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2019, 74: 865-890.
- [58] Wang Q, Zhou Y. Imbalance of Carbon Emissions Embodied in the US-Japan Trade: Temporal Change and Driving Factors [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117780.
- [59] Yang L, Lahr M L. The Drivers of China's Regional Carbon Emission Change——A Structural Decomposition Analysis from 1997 to 2007 [J]. *Sustainability*, 2019, 11: 3254.
- [60] Franzen A, Mader S. Consumption-based Versus Production-based Accounting of CO₂ Emissions: Is There Evidence for Carbon Leakage? [J]. *Environmental Science and Policy*, 2018, 84: 34-40.
- [61] Wachsmann U, Wood R, Lenzen M, et al. Structural Decomposition of Energy Use in Brazil from 1970 to 1996 [J]. *Applied Energy*, 2009, 86: 578-587.
- [62] Ang B W. Decomposition Analysis for Policymaking in Energy: Which is the Preferred Method? [J]. *Energy Policy*, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [63] Zhou X, Zhou D, Wang Q. How Does Information and Communication Technology Affect China's Energy Intensity? A Three-tier Structural Decomposition Analysis [J]. *Energy*, 2018, 151: 748-759.
- [64] Yan J, Zhao T, Kang J. Sensitivity Analysis of Technology and Supply Change for CO₂ Emission Intensity of Energy-intensive Industries Based on Input-output Model [J]. *Applied Energy*, 2016, 171: 456-467.

[65] Xie R, Wang F, Chevallier J, et al. Supply-side Structural Effects of Air Pollutant Emissions in China: A Comparative Analysis [J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2018, 46: 89-95.

[66] Wang Z, Su B, Xie R, et al. China's Aggregate Embodied CO₂ Emission Intensity from 2007 to 2012: A multi-region Multiplicative Structural Decomposition Analysis [J]. Energy Economics, 2020, 85: 104568.

[67] Zhou X, Zhou D, Wang Q, et al. Who Shapes China's Carbon Intensity and How? A Demand-side Decomposition Analysis [J]. Energy Economics, 2020, 85: 104600.

责任编辑: 曲 红

Review of Energy/Carbon Intensity Studies Using Multiplicative Structural Decomposition Analysis Framework

YAN Junna¹, SU Bin², LI Yingzhu³

(1. Business School, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China;
2. Energy Studies Institute, National University of Singapore, 119620 Singapore;
3. School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Within the energy and environment field, intensity indicator, which measures the relative efficiency of energy use and carbon emissions, has been widely adopted in the national energy conservation and mitigation goal and the related policy formulation. Multiplicative structural decomposition analysis (M-SDA), which is based on the input-output model, can quantitatively decompose the changes/differences in the intensity indicator in a systematic way. In recent years, M-SDA has achieved a rapid development in the aspects of methodology and application. This paper reviews the M-SDA studies on energy and emissions during 2010—2019. It is found that (1) the number of the studies has shown a quick growth trend; (2) the topic has expanded from single-region to multi-region issue; (3) the non-competitive imports assumption has been the most frequent choice; (4) there are increasing researches with large number of decomposed factors; (5) the D&L (or generalized Fisher index) method is the commonly adopted decomposition technique in M-SDA studies. On these bases, this paper summarizes the methodology development of M-SDA and the research gap in the near future.

Key words: structural decomposition analysis; multiplicative decomposition; intensity indicator; energy and environment field; China