

【产业经济】

碳减排目标下的广东省产业结构优化研究

——基于投入产出模型和多目标规划模型的模拟分析

张捷^{1,2}, 赵秀娟¹

(1. 暨南大学经济学院, 广州 广东 510632;

2. 暨南大学资源环境与可持续发展研究所, 广州 广东 510632)

[摘要] 本文通过构建理论模型,证明了在经济增长率及技术进步率不变的前提下,可以通过加快调整产业结构来推动碳减排目标的实现。本文将广东省作为案例,运用投入产出模型测算了广东省28个产业的经济关联与碳排放关联,根据这两种关联的差异选择出需要限制发展和需要鼓励发展的产业组别,在此基础上,利用多目标规划模型设置不同情景,对广东省2012年的产业结构进行了模拟分析。模拟结果表明:通过在综合权衡碳排放关联和经济关联的基础上采取差异化的产业结构调整政策,广东省可以在保持总投资不变的前提下,同时实现降低碳排放与保持经济较高增长的双重目标;而且产业结构调整的力度越大,预期碳排放减少和GDP提高的幅度也越大。主要启示是:在进行产业结构调整时需要统筹兼顾产业之间的经济联系与碳排放联系,通过实施差异化的产业政策,寻求合意的均衡点,从而同时实现调结构和保增长的“双赢”局面。

[关键词] 二氧化碳排放; 产业结构优化; 投入产出模型; 多目标规划模型

[中图分类号]F421 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1006-480X(2015)06-0068-13

一、问题提出

2014年11月12日中美两国元首在北京发表联合声明,宣布了两国2020年后应对气候变化的行动目标。中国承诺到2030年前后二氧化碳排放达到峰值且将努力早日实现这一减排目标。《国家应对气候变化规划(2014—2020年)》中提出的控制温室气体的第一条措施是调整产业结构,要求控制高耗能、高排放行业产能扩张,修订产业结构调整指导目录,等等。但问题是2014年以来中国经济的下行压力有增无减,投资再次成为保增长的主要力量。在这种背景下,限制“三高”产业的产业结构调整措施有必要继续实施吗?减少碳排放的目标与保增长的措施能够并行不悖吗?广东省是中国首批开展低碳经济试点的省份之一,国家规定2015年广东单位GDP的二氧化碳排放(碳强度)应比2010年下降19.5%,降幅为全国各省市最大。同时,广东省又是全国制造业大省,产业结构门类齐全,进入21世纪以来重化工业发展迅速。因此,本文以广东省为案例,探讨为实现碳减排目标,如何在推进产业结构调整的同时使经济增长保持合意的增长速度。

[收稿日期] 2015-04-02

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目“推动经济发达地区产业转型升级的机制与政策研究”(批准号71333007)。

[作者简介] 张捷(1953—),男,重庆人,暨南大学经济学院教授,博士生导师,暨南大学资源环境与可持续发展研究所所长;赵秀娟(1982—),女,河南三门峡人,暨南大学经济学院博士研究生。

国外学者对碳排放的研究主要集中在能源价格、技术进步、低碳政策等对碳排放的影响方面,产业结构与碳排放的关系并非研究重点。中国(包括广东省)正处于调结构、稳增长的关键时期,依靠产业结构优化实现节能减碳目标则受到了政府和学术界的关注。碳排放的主要来源是化石能源燃烧,碳强度与能源强度、碳排放与能源消费均存在强的正相关关系,因此,节能和减碳的目标是一致的。以能源强度为例,其变化可以分解为结构份额和效率份额^[1],此处的结构主要是指产业结构,效率是指能源利用效率,包括能源技术进步效率和能源经济效率^[2]。因此,中国研究节能减排的文献要么强调结构节能^[1,3],要么强调技术节能^[4],要么强调综合因素的作用,认为除了产业结构、技术进步之外,能源价格、能源结构、管理水平等因素也会对节能产生影响^[2,5]。推崇结构节能的学者大都建议降低能源强度高的产业如重化工业的比重,提高能源强度低的产业如第三产业和高科技产业的比重,反对结构节能的学者主要考虑到结构节能会影响经济增长。可见,在不影响经济增长的前提下进行结构节能是不存在争议的。本文同时考虑减少碳排放和经济增长,基于投入产出模型,测算了广东省 28 个产业的经济关联和碳排放关联,识别了需要限制和鼓励发展的产业,使得产业结构调整视角更加全面。

在碳减排的目标下对产业结构进行优化的实质是将资源在各个产业之间重新配置,提高经济增长质量。一个国家或地区的产业结构取决于该国或该地区的资源禀赋、产品供求状况、技术水平、产业政策乃至历史机遇,一直处于不断的变化之中。产业结构优化本身不是目的,而是实现经济转型的手段。大多数学者采取多目标规划模型,对省域层面有限行业的结构调整进行了模拟研究^[6,7],但对省域层面较多的产业结构优化研究的文献不多。本文尝试研究广东省在保持 2012 年投入不变的前提下,如何通过产业结构优化实现 GDP 的较高增长和能源消费以及碳排放的减少等多个目标,为广东省乃至全国的调结构和保增长提供一种思路和有益的启示。

二、理论构建

本文在 Stefański^[8]两部门经济分析的基础上,假定经济中有三个部门,即农业、工业和服务业,分别用 A、B、C 表示,每个部门的碳排放及经济中总的碳排放均与产出正相关。 P_t 、 N_t 、 Y_t 分别表示整个经济在时点 t 的碳排放、碳强度和总产出。 $p_{i,t}$ 、 $n_{i,t}$ 、 $y_{i,t}$ 、 $r_{i,t}$ 分别表示部门 i 在时点 t 的碳排放、碳强度、产出和产出在总产出中的份额。假定工业的碳强度最高,农业最低; $\dot{n}_{i,t}$ 、 $\dot{r}_{i,t}$ 分别表示部门 i 在时点 t 的碳强度、产出份额对时间的一阶导数,则有:

$$P_t = N_t Y_t \quad (1)$$

$$p_{i,t} = n_{i,t} y_{i,t} \quad (2)$$

$$r_{i,t} = y_{i,t} / Y_t \quad (3)$$

$$r_{A,t} + r_{B,t} + r_{C,t} = 1 \quad (4)$$

$$\dot{r}_{A,t} + \dot{r}_{B,t} + \dot{r}_{C,t} = 0 \quad (5)$$

$$n_{B,t} > n_{C,t} > n_{A,t} \quad (6)$$

$$N_t = \frac{P_t}{Y_t} = \frac{\sum_i p_{i,t}}{Y_t} = \frac{\sum_i n_{i,t} y_{i,t}}{Y_t} = \sum_i n_{i,t} \frac{y_{i,t}}{Y_t} = \sum_i n_{i,t} r_{i,t} \quad (7)$$

$$P_t = N_t Y_t = (\sum_i n_{i,t} r_{i,t}) Y_t \quad (8)$$

分别对式(7)—(8)两边取对数,再对时间求一阶导,结合式(4)—(5)可得,碳强度、碳排放、产出的增长率 $g_{N,t}$ 、 $g_{P,t}$ 、 $g_{Y,t}$ 满足:

$$g_{N,t} = \frac{r_{B,t}(\dot{n}_{B,t} - \dot{n}_{A,t}) + r_{C,t}(\dot{n}_{C,t} - \dot{n}_{A,t}) + \dot{n}_{A,t}}{r_{B,t}(n_{B,t} - n_{A,t}) + r_{C,t}(n_{C,t} - n_{A,t}) + n_{A,t}} + \frac{\dot{r}_{B,t}(n_{B,t} - n_{A,t}) + \dot{r}_{C,t}(n_{C,t} - n_{A,t})}{r_{B,t}(n_{B,t} - n_{A,t}) + r_{C,t}(n_{C,t} - n_{A,t}) + n_{A,t}} = g_{A,t} + g_{S,t} \quad (9)$$

$$g_{P,t} = g_{Y,t} + g_{N,t} = g_{Y,t} + g_{A,t} + g_{S,t} \quad (10)$$

式(9)中的 $g_{A,t}$ 表示技术效应,取决于各产业碳强度的变化率; $g_{S,t}$ 表示结构效应,取决于产业结构的变化。式(10)诠释了 Grossman and Krueger^[9]提出的经济增长对环境影响的规模效应($g_{Y,t}$)、技术效应($g_{A,t}$)和结构效应($g_{S,t}$)。本文主要研究产业结构变化的影响,假设规模、技术效应均为常数,即 $g_{Y,t} = g_Y$ 且 $g_{A,t} = -g_A$,该假设受到了 Brock and Taylor^[10]绿色索洛模型的启发,其假设经济增长率不断下降,降低污染的技术进步率不变,不存在结构效应,随着时间推移,污染物增长率先为正值后为负值,导致污染物排放先增加后降低。

假定当 $t=0$ 时,经济开始从农业经济向工业经济转型,农业萎缩,工业和服务业产出比重上升,即 $\dot{r}_{B,t} > 0$ 且 $\dot{r}_{C,t} > 0$,根据式(6)可知初始的结构效应为正值,假设在抵消了技术效应后仍然为正值。当 $t > 0$ 时,随着转型的进行,工业产出和服务业产出比重的增长幅度均下降,即 $\dot{r}_{B,t}$ 和 $\dot{r}_{C,t}$ 虽然大于 0,但都在变小,导致结构效应下降,不过仍然高于 g_A ,根据式(9)—(10)可得 $g_{N,t} > 0$ 且 $g_{P,t} > 0$,碳强度和碳排放均呈现上升趋势(见图 1)。

当 $t=t_N^*$ 时,结构效应下降至 g_A ,因而 $g_{N,t} = 0$,碳强度达到峰值, $g_{P,t}$ 仅取决于产出的增长率 g_Y 。当 $t > t_N^*$ 时,工业化发展到成熟阶段,根据钱纳里等人提出的产业结构演进的一般规律,工业发展将放缓甚至出现产出比重下降的现象,服务业产出比重继续上升,出现由工业经济向服务经济的转型,此时结构效应继续起作用,并开始低于 g_A ,但仍大于 $(g_A - g_Y)$,可得 $g_{N,t} < 0$ 且 $g_{P,t} > 0$,表现为碳强度下降而碳排放继续上升。

当 $t=t^*$ 时,结构效应下降至 $(g_A - g_Y)$,则有 $g_{N,t} = -g_Y$,即碳强度的下降率等于经济增长率, $g_{P,t} = 0$,此时碳排放量达到峰值。当 $t > t^*$ 后,如结构效应持续下去,开始小于 $(g_A - g_Y)$,使得 $g_{N,t} < 0$ 且 $g_{P,t} < 0$,则碳强度和碳排放均下降。假设当 $t=t^s$ 时,政府设定碳减排目标,希望将碳排放峰值出现的时间从 t^* 提前至 $t^{*'}$,并且使 $t > t^s$ 时的碳排放低于没有碳减排目标时的水平,即从 $t > t^s$ 起,碳排放曲线 P_t 移动至 P_t' ,碳排放增长率曲线 $g_{P,t}$ 降至 $g_{P,t}'$ 。当经济增长率、技术进步率不变时,根据式(10)可知,结构效应必须降至 $g_{S,t}' = g_{P,t}' - g_Y + g_A$,且在 $t=t^{*'}$ 时降至 $(g_A - g_Y)$,而不是等到 $t=t^*$ 。相应地,从 $t > t^s$ 起,碳强度变化率曲线降至 $g_{N,t}'$,碳强度曲线降至 N_t' 。

总之,当经济增长率与全社会降低碳排放的技术进步率不变时,为实现碳减排目标,必须进行产业结构调整,挖掘结构减碳的潜力。但如何进行产业结构调整方能实现这一目标需进行模拟分析。

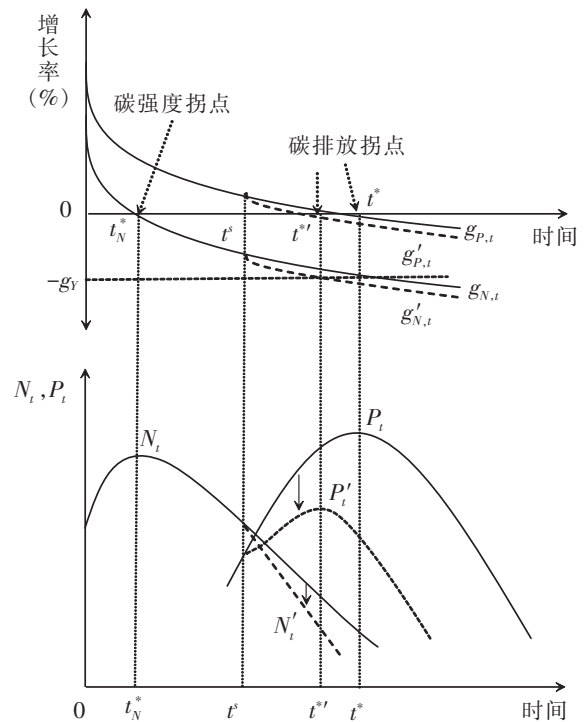


图 1 碳减排目标下的产业结构调整

资料来源:作者绘制。

三、方法选择、数据处理及模型设定

1. 方法选择

(1)基于投入产出模型的产业关联分析方法的选择。产业关联表现为产业间的经济关联,取决

于各产业的技术关系。学术界对于拉斯姆森计算产业后向关联的方法达成了一致,但对于产业前向关联的计算还存在争议。Jones^[11]认为拉斯姆森前向关联或者感应度系数的经济意义不明确,并指出利用对 Ghosh 逆矩阵的行向元素求和来衡量部门的前向关联。为此,本文分别采用拉斯姆森计算后向关联和 Jones 计算前向关联的方法。虽然以上方法仍存在不足,如未考虑产业的规模因素^[12],后来的文献又提出了虚拟消去法和加权关联法,但前者的缺陷在于部门消失的假设前提过于极端,与实际不符;后者的问题在于很难选择一个符合客观现实的权重,故本文未采取这些方法。

研究开放经济(有进出口)条件下一个国家的产业关联时,关注的焦点在于国内产业受到的影响,应只根据国内投入来核算产业关联,需要调整投入产出表^①;否则,会高估产业关联。在无法获得各部门的进口投入数据的情况下,通常的做法是假设进口投入与国内投入具有同质性,认为每个部门国内投入占总投入的比重是一定的。根据 Larh^[13],该比重的一般形式为:

$$d=x/[x+m+(\theta-1)e] \quad (11)$$

其中, $0 \leq d \leq 1$, x, m, e 分别表示该部门的产出、进口和出口, θ 为可调整的参数,满足 $\theta=e^d/(d \times e)$,其中 e^d 为使用国内投入的出口产出, $0 \leq \theta \leq 1/d$ 。按照对再出口的假设不同, d 的公式会发生变化(见表 1)。

表 1 国内投入比例的不同形式及计算公式

形式	假设	θ 的取值范围	公式序号	d 的公式
只有再出口	所有出口来自进口	$\theta=0$	1	$x/(x+m-e)$
再出口大	出口产品比国内产品的进口含量高	$0 < \theta < 1$	2	$x/[x+m+(\theta-1)e]$
平均再出口	出口产品与国内产品的进口含量相同	$\theta=1$	3	$x/(x+m)$
再出口小	出口产品比国内产品的进口含量低	$1 < \theta < 1/d$	4	$x/[x+m+(\theta-1)e]$
没有再出口	所有出口来自国内投入	$\theta=1/d$	5	$(x-e)/(x+m-e)$

资料来源:详见 Larh^[13]。

Andreosso-O'Callaghan and Yue^[14]研究中国的产业关联时,没有调整投入产出表。有些学者调整了投入产出表,采用比较多的是表 1 中列出的公式 3 和公式 5,不限于研究产业关联,还包括对于贸易隐含碳的测算^[15],在研究中具体采取哪一种方法取决于对再出口的假设。

广东省的投入产出表还包括了流入项,对其处理类似于对进口的处理,采用公式 3 对直接消耗系数矩阵进行调整。原因在于采用公式 5 后,本文得到个别产业的省内投入比重小于 0 的反常结果,表明广东省流出的最终产品中包含着从其他地区流入的最终产品,所以,运用公式 5 不合适。

本文运用如下公式计算广东省各产业的经济前向关联和后向关联:

$$FL_i = \frac{\sum_{j=1}^n g_{ij}^d}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n g_{ij}^d)} \quad (12)$$

$$BL_j = \frac{\sum_{i=1}^n l_{ij}^d}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^n l_{ij}^d)} \quad (13)$$

其中, FL, BL 分别表示经济前向、后向关联; i, j 表示部门; n 表示部门数; g_{ij}^d 为调整后的 Ghosh 逆矩阵中的元素,表示部门 i 的最初投入增加 1 单位所推动的部门 j 的省内总产出; l_{ij}^d 为调整后的里昂惕夫逆矩阵中的元素,表示部门 j 的最终使用增加 1 单位所需要的部门 i 的省内总产出。

$FL_i > 1$ 表明 i 部门的初始投入增加 1 个单位时,其对省内经济的推动作用大于当所有部门的初始投入均增加 1 个单位时的推动作用。 $BL_j > 1$ 表明 j 部门的最终使用增加 1 个单位时,其对省内经

① 并不是任何情况下均需要调整投入产出表,主要取决于投入产出表的类型及研究目的。

济的拉动作用高于当所有部门的最终使用均增加 1 个单位时的拉动作用。借鉴李博^[6]的划分标准,将 $FL > 1$ 且 $BL > 1$ 的产业归为支柱产业, $FL < 1$ 且 $BL < 1$ 的产业归为发育不足产业。

(2) 基于投入产出模型的碳排放关联分析方法的选择。随着环境问题日益受到重视,学者们开始运用投入产出模型来分析产业之间的污染及碳排放的关联。各产业在经济上发生前后向关联的同时也发生着“碳关联”,即“购买”其他部门的碳排放(碳后向关联)以及“出售”自身的碳排放(碳前向关联)。本文根据如下公式测算广东省各产业的碳排放前向关联和后向关联:

$$FL_i^c = \frac{\sum_{j=1}^n g_{ij}^d c_j}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n g_{ij}^d c_j)} \quad (14)$$

$$BL_j^c = \frac{\sum_{i=1}^n c_i l_{ij}^d}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^n c_i l_{ij}^d)} \quad (15)$$

其中, FL^c 、 BL^c 分别表示碳排放前向、后向关联; c_i 、 c_j 分别表示部门 i 、 j 单位产出产生的直接碳排放量,其他符号的含义与前文所述一致。

对式(12)—(15)比较后可知,碳排放关联实际上是对经济关联的一种修正。 $FL_i^c > 1$ 表明 i 部门的初始投入增加 1 个单位时,其推动省内产出增长而带来的碳排放大于当所有部门的初始投入均增加 1 个单位时所带来的碳排放的平均值。 $BL_j^c > 1$ 表明 j 部门的最终使用增加 1 个单位时,其拉动省内产出增长而带来的碳排放高于当所有部门的最终使用均增加 1 个单位时带来的碳排放的平均值。本文将 $FL^c > 1$ 且 $BL^c > 1$ 的部门归为重要的碳排放部门, $FL^c < 1$ 且 $BL^c < 1$ 的部门归为不重要的碳排放部门。

降低重要的碳排放部门的比重,提高不重要的碳排放部门的比重,通过产业结构调整就可以实现节能减碳目标。但是,限制产业的发展会在一定程度上导致产出下降,即宏观经济损失。产业关联分析为解决经济增长与碳排放下降的矛盾提供了思路,即限制碳排放关联强而经济关联弱的产业发展,鼓励碳排放关联弱但经济关联强的产业发展。

(3) 多目标规划模型求解方法的选择。多目标规划模型的求解方法有目标规划法^[7]、评价函数法^[6]、主目标法^[17]。评价函数法设置不同目标的权重,直接求解;主目标法则先选定一个目标进行优化,其他目标达到一定要求即可;目标规划法事先确定各个目标的优先级,将每个约束条件设置一个目标值,通过求偏差变量(预期值与目标值的差)的极小值来求解,优点在于无需将不同单位的目标转换为相同单位,可以根据需要设置目标值,正、负偏差变量的取值会随着目标值的变化而变化,不会影响决策变量的满意解,本文使用该方法进行求解。

2. 数据处理

本文的研究步骤为:①核算广东省 2007 年和 2012 年各行业的碳强度。②计算 2007 年广东省各产业的增加值率、省内直接消耗系数矩阵。③计算广东省 2007 年各产业的经济关联、碳排放关联,选择广东省需要鼓励发展和限制发展的产业组别。④考察广东省 2012 年的 GDP、产业结构和碳排放的总体情况。⑤确定广东省 2012 年的产业结构优化要达到的目标,建立产业结构优化模型。

广东省 2007 年的投入产出表包括 42×42 部门,产业结构优化的重点在于第二产业,本文对第三产业进行合并,得到了 28×28 部门的投入产出表,具体产业见表 2。能源消费量(标准煤及实物量)数据来自《中国能源统计年鉴》中的广东能源平衡表。2007 年各产业增加值数据来自投入产出表,2012 年各产业增加值数据来自 2013 年《广东统计年鉴》、《中国统计年鉴》。

(1) 广东省 2007 年和 2012 年各产业的碳强度。能源消费是碳排放的主要来源,此处采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐的排放因子法根据能源消费数据核算碳排放。广东省能

表 2 广东省 28 个产业的经济关联和碳排放关联

序号	前向关联	后向关联	碳前向关联	碳后向关联	序号	前向关联	后向关联	碳前向关联	碳后向关联
1	0.937	0.829	0.573	0.557	15	0.664	1.062	0.335	0.685
2	1.512	0.652	1.944	0.357	16	0.795	1.130	0.340	0.513
3	1.188	0.881	1.128	0.882	17	0.796	1.120	0.315	0.660
4	1.252	0.986	1.833	1.050	18	0.930	1.188	0.296	0.568
5	0.776	1.086	0.461	0.726	19	0.708	1.088	0.326	0.550
6	1.033	1.103	1.125	1.337	20	0.744	1.061	0.369	0.813
7	0.605	1.032	0.326	0.769	21	1.399	0.724	0.865	0.211
8	0.790	1.187	0.427	0.846	22	1.505	1.026	2.043	1.651
9	1.010	1.139	0.838	1.017	23	1.516	1.031	1.183	0.144
10	1.052	0.774	2.238	1.678	24	1.046	0.921	1.201	1.297
11	1.140	1.068	0.915	1.021	25	0.497	1.176	0.100	1.138
12	1.009	1.145	2.905	3.441	26	1.056	0.880	2.852	2.881
13	1.087	0.896	1.396	1.452	27	0.792	0.859	0.541	0.591
14	1.268	1.109	0.729	0.856	28	0.893	0.848	0.396	0.310

注：序号代表的产业名称分别为：1 农林牧渔业，2 煤炭石油采选业，3 金属矿采选业，4 非金属矿及其他矿采选业，5 食品制造及烟草加工业，6 纺织业，7 纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业，8 木材加工及家具制造业，9 造纸印刷及文教体育用品制造业，10 石油加工炼焦及核燃料加工业，11 化学工业，12 非金属矿物制品业，13 金属冶炼及压延加工业，14 金属制品业，15 通用专用设备制造业，16 交通运输设备制造业，17 电气机械及器材制造业，18 通信设备计算机及其他电子设备制造业，19 仪器仪表及文化办公用机械制造业，20 工艺品及其他制造业，21 废品废料业，22 电力热力的生产和供应业，23 燃气生产和供应业，24 水的生产和供应业，25 建筑业，26 交通运输仓储和邮政业，27 批发零售和住宿餐饮业，28 其他服务业。下同。

资料来源：作者计算。

源平衡表(实物量)含 28 种化石能源及电力、热力 2 种二次能源共 30 种能源的消费量。28 种化石能源的二氧化碳排放因子是根据中国国家发展和改革委员会发布的《省级温室气体清单编制指南(试行)》、IPCC 发布的《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》和世界资源研究所发布的《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南(2.1 版)》的数据计算。电力、热力在消费环节产生的碳排放以及二氧化碳排放因子的计算借鉴齐绍洲和付坤^[8]的方法，将电力、热力在生产端产生的碳排放放在生产端和消费端进行排放责任分摊。考虑到广东能源平衡表(实物量)报告了终端能源消费端工业整体的能源消费数据，无法进行深入研究。本文在计算出工业碳排放后，根据当年工业分行业能源消费占工业能源消费总量(均为标准煤)的比重，推算出广东省工业 23 个分行业的碳排放，再除以各行业增加值，得到广东省各行业的碳强度。能源强度直接用各产业能源消费除以增加值得到。

(2)广东省 2007 年各产业的增加值率及省内直接消耗系数矩阵。无论中间投入是否来自本省，投入产出表的纵向平衡关系仍然满足：中间投入+最初投入(增加值)=总投入。增加值率与增加值、总投入之间的关系为：增加值率=增加值/总投入。以 V_j 表示广东省 j 产业的增加值率，则有：

$$V_j = 1 - \sum_{i=1}^{28} a_{ij} \quad (16)$$

增加值率的计算需要考虑来自省内外的所有投入，所以， a_{ij} 为未经调整的直接消耗系数矩阵的元素。另外，根据前文的调整方法还可得到广东省内的直接消耗系数矩阵。

(3)广东省 2007 年各产业的经济关联和碳排放关联。从表 2 可知，纺织业、造纸印刷及文教体育用品制造业、化学工业、非金属矿物制品业、金属制品业、电力热力的生产和供应业、燃气的生产和供应业等 7 个产业的经济前、后向关联均大于 1，对经济的影响较大。农林牧渔业、批发零售和住宿餐饮业、其他服务业等 3 个产业的前、后向关联均小于 1，表明这些产业相对独立或者参与社会再生产的程度不高。

再看各产业的碳排放关联。非金属矿及其他矿采选业、纺织业、石油加工炼焦及核燃料加工业、非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业、电力热力的生产和供应业、水的生产和供应业、交通运输仓储和邮政业等产业的碳前、后向关联均大于 1, 是重要的碳排放产业。农林牧渔业、食品制造及烟草加工业、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业、木材加工及家具制造业、表 2 中序号 14—21 的产业、批发零售和住宿餐饮业、其他服务业等产业的碳前、后向关联均小于 1, 是不重要的碳排放产业。

可见, 各产业的经济关联和碳排放关联是有差异的。为了实现碳减排和经济增长的目标, 这里将碳排放关联强而经济关联弱的产业归类为限制发展产业组别, 包括非金属矿及其他矿采选业、石油加工炼焦及核燃料加工业、金属冶炼及压延加工业、水的生产和供应业、交通运输仓储和邮政业等 5 个产业, 考虑到非金属矿物制品业的碳排放关联为平均值的 2 倍以上, 虽然其经济关联也较高, 但仍然将其列为限制发展产业。另外, 电力热力的生产和供应业、水的生产和供应业、交通运输仓储和邮政业等产业虽然碳排放关联较高, 但它们均属于涉及民生的公共基础产业, 故将其排除在限制发展产业组别之外, 于是本文得到 4 个需要限制发展的产业。同时, 将碳排放关联弱但经济关联强的产业归为鼓励发展产业组别, 具体包括食品制造及烟草加工业、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业、木材加工及家具制造业、以及序号 14—21 的 8 个产业, 共 11 个产业。

(4) 广东省 2012 年 GDP、产业结构和碳排放情况。这是本文分析的出发点。2012 年广东省的 GDP 为 570.68 百亿元, 三次产业增加值的比重之比为 4.99:48.54:46.47, 各产业碳排放的比重之比为 1.79:74.28:23.93; 限制发展和鼓励发展产业组的增加值比重之比为 4.9:27.71, 碳排放的比重之比为 26.47:17.53; 能源消费量为 253.09 百万吨标准煤, 碳排放量为 355.08 百万吨。

3. 多目标规划模型设定

碳减排目标下的产业结构优化兼顾经济增长等目标之后才具有现实意义。本文将产业结构优化需要满足的目标分为 4 个层级, 并设定同一层级目标中各个约束的权重相同, 模型如下:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & z = P_1(d_1^+ + d_1^-) + P_2(d_2^- + d_3^+ + d_4^+) + P_3(d_5^+ + d_6^-) + P_4(d_7^+ + d_8^-) \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{28} b_{ij} x_j - y_i = 0 \\
 & \sum_{j=1}^{28} x_j + d_1^- - d_1^+ = \sum_{j=1}^{28} \bar{x}_j = 1826.23 \\
 & \sum_{j=1}^{28} (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{ij}) x_j + d_2^- - d_2^+ = 599.21 \\
 & \sum_{j=1}^{28} c_j (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{ij}) x_j + d_3^- - d_3^+ = 337.33 \\
 & \sum_{j=1}^{28} e_j (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{ij}) x_j + d_4^- - d_4^+ = 240.44 \\
 & \sum_m (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{im}) x_m - 0.049 \sum_{j=1}^{28} (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{ij}) x_j + d_5^- - d_5^+ = 0 \\
 & \sum_n (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{in}) x_n - 0.28 \sum_{j=1}^{28} (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{ij}) x_j + d_6^- - d_6^+ = 0 \\
 & (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{i1}) x_1 - 0.05 \sum_{j=1}^{28} (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{ij}) x_j + d_7^- - d_7^+ = 0 \\
 & \sum_{j=26}^{28} (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{ij}) x_j - 0.48 \sum_{j=1}^{28} (1 - \sum_{i=1}^{28} a_{ij}) x_j + d_8^- - d_8^+ = 0
 \end{aligned} \tag{17}$$

其中, P_1-P_4 表示 4 个层级目标, $d_k^+, d_k^- (k=1, 2, \dots, 8)$ 表示第 k 个软约束的正、负偏差变量, 均为非负数; 约束条件中的第一个等式表示 28 个硬(刚性)约束条件, 表示 28 个产业的产出(投入)必须满足投入产出模型的横向平衡关系: 中间使用+最终使用-流入=总产出, 其中 b_{ij} 为里昂惕夫矩阵(即单位阵减去直接消耗系数矩阵)中的元素; $x_j, y_i (i, j=1, 2, \dots, 28)$ 为待估计变量, x_j 表示产业结构优化后 j 产业的产出(投入), 为非负数, y_i 表示产业结构优化后 i 产业的最终使用减去流入, 取值范围不限。接下来为 8 个软(柔性)约束条件, 其中, a_{ij} 表示直接消耗系数矩阵的元素; \bar{x}_j, c_j, e_j 分别表

示广东省2012年 j 产业的实际投入、碳强度、能源强度; m 、 n 分别表示限制和鼓励发展产业的序号,其中, $m=4,10,12,13$, $n=5,7,8,14-21$ 。

第一层级目标为总投入(产出)保持基本不变。参照薛声家^[7]的做法,在总投入不变的前提下研究产业结构优化,问题是无法得到各个产业的投入数据,只能得到各个产业的增加值。根据投入=增加值/增加值率,如果知道各行业的增加值率,就可以推算出投入数据。增加值率可以利用投入产出表计算,但投入产出表的编制存在滞后性(广东省最新投入产出表为2007年)。投入产出表代表了各个产业之间的技术联系,除非发生重大的技术变迁,这种联系通常具有较强的稳定性。此处借鉴沈利生和吴振宇^[8]的做法,假设广东省2012年的投入产出关系与2007年相同,即直接消耗系数、增加值率均保持不变,最终得到总投入为1826.23百亿元。该目标体现为同时极小化第1个软约束的正、负偏差变量。

第二层级目标为预期GDP比实际GDP增加5%且预期碳排放量、能源消费量均比实际值降低5%,这是本文关注的要点。碳强度和能源强度随着GDP的增加或者碳排放量和能源消费量的减少而降低。本文的目标是:经过产业结构优化,广东省2012年的GDP可以比实际值570.68百亿元增加5%,达到599.21百亿元,而碳排放量则比实际值降低5%,达到337.33百万吨,能源消费量也比实际值降低5%,为240.44百万吨,为此,目标设置为极小化第2个软约束的负偏差变量和第3、4个软约束的正偏差变量。

第三层级目标为限制发展产业组别的4个产业的增加值比重小于等于实际值4.9%;鼓励发展产业组别的11个产业的增加值比重大于实际值27.71%,此处设定为不低于28%,为此,极小化第5个软约束的正偏差变量和第6个软约束的负偏差变量。

第四层级目标为第一产业增加值比重不高于5%,第三产业增加值比重大于实际值46.47%,此处设定为不低于48%,因此,极小化第7个软约束的正偏差变量和第8个软约束的负偏差变量。

产业结构优化是个动态的过程,本文的模拟做的是比较静态分析,为了体现不同的产业结构调整力度对经济增长、节能减排影响的具体过程,本文逐步加大投入和最终使用减去流入的波动范围,共设置三种情景进行模拟:①情景1:借鉴薛声家^[7]的做法,各产业投入(产出)在上下15%的范围内波动,最终使用减去流入在上下10%的范围内波动^①;②情景2:投入和最终使用减去流入分别在上下20%、15%的范围内波动;③情景3:投入和最终使用减去流入分别在25%、20%上下的范围内波动。另外,煤炭石油采选业、电力热力的生产和供应业、燃气生产和供应业、水的生产和供应业、交通运输仓储和邮政业等5个产业为关系国计民生的能源及公共基础产业,不允许这些产业降低投入,分别将这些产业投入的波动范围设置为0%—15%、0%—20%和0%—25%。

四、实证结果

模型求解采取目标规划法的序贯式算法。令 $P_1=1, P_2, P_3, P_4=0$,得出满足第一层级目标时第1个约束的偏差变量。在此基础上,令 $P_2=1, P_1, P_3, P_4=0$,得出满足第二层级目标时第1—4个约束的偏差变量,以此类推,得出所有约束的偏差变量及模型的合意解。

1. 偏差变量分析

从表3可知,第1个软约束在三种情景下的正、负偏差变量均为0,即投入不变的目标可以实现。第2个软约束为GDP达到599.21百亿元,而三种情景下的 d_2^- 均小于0,表明这个目标均无法实现,但可以看到 d_2^- 随着投入波动范围的加大而降低,表明加大产业结构调整力度有助于促进经济增长。在情景1中, $d_2^-=24.12$ 表明模型模拟出的预期GDP为599.21减去24.12,即575.09百亿元;同理在情景2、3下预期GDP分别为578.53百亿元、582.02百亿元,虽未实现GDP增长5%的目标,但

① 薛声家的做法没有这个约束条件,此处加入该约束条件是为了降低产业结构调整对最终使用及流入的影响。

预期 GDP 均高于实际值。第 3 个软约束为碳排放量小于等于 337.33 百万吨,而 d_3^+ 均大于 0,表明这个目标也无法实现;在情景 1 中, $d_3^+=15.13$ 表明模型得出的预期碳排放量应为 337.33+15.13,即 352.46 百万吨,同理可得情景 2、3 下的预期碳排放量分别为 351.25 百万吨、350.08 百万吨,均低于实际值。第 4 个软约束为能源消费量小于等于 240.44 百万吨,而 d_4^+ 均大于 0,表明这个约束不能满足,可得三种情景下的预期能源消费分别为 251.61 百万吨、251 百万吨、250.40 百万吨。第 5 个软约束为限制发展产业组的比重小于等于 0.049,而 d_5^- 均为负值,表明这个目标可以实现,在情景 1 中, $d_5^-=0.98$ 表明限制发展产业组的预期比重为 $0.049-0.98/\text{GDP}=0.049-0.98/575.09\approx 0.0473$,在情景 2、3 下这一比重分别为 0.0463、0.0454。第 6 个软约束为鼓励发展产业组的比重大于等于 0.28,三种情景下的 d_6^- 均为 0,表明这个约束条件均可满足。第 7 个软约束为农林牧渔产业的比重小于等于 0.05,而三种情景下的 d_7^- 均小于 0,表明这个约束条件可满足,且该产业的预期比重分别为 0.0496、0.0494、0.0493。第 8 个软约束为第三产业的比重大于等于 0.48,而在三种情景下 d_8^- 均小于 0,表明这个约束条件未得到满足, d_8^- 在三种情景下依次降低,表明第三产业的比重随着调整力度加大而增加,该产业的预期比重分别为 0.4677、0.4711、0.4744,均高于实际比重 0.4647。总之,随着产业结构调整力度的加大,预期 GDP 逐渐增加,预期能源消费、碳排放均逐渐降低。

表 3 产业结构优化模型的偏差变量

情景	k	1	2	3	4	5	6	7	8
情景 1	d_k^+	0.00	0.00	15.13	11.17	0.00	0.00	0.00	0.00
	d_k^-	0.00	24.12	0.00	0.00	0.98	0.00	0.24	7.05
情景 2	d_k^+	0.00	0.00	13.92	10.56	0.00	0.00	0.00	0.00
	d_k^-	0.00	20.68	0.00	0.00	1.55	0.00	0.35	5.15
情景 3	d_k^+	0.00	0.00	12.75	9.96	0.00	0.00	0.00	0.00
	d_k^-	0.00	17.19	0.00	0.00	2.12	0.00	0.41	3.25

资料来源:作者根据 lingo14.0 软件结果整理。

2. 产业结构优化结果分析

鉴于本文从投入不变的角度研究产业结构优化,这里根据不同情景模拟得出的各产业的预期投入,计算预期投入的增长率,还结合增加值率计算各产业的预期比重(见表 4)。

从不同情景下各产业的预期投入增长率看,有 10 个产业的预期投入增加了,这些产业包括食品制造及烟草加工业、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业、金属制品业、通用专用设备制造业、交通运输设备制造业、电气机械及器材制造业、废品废料业等 7 个需要鼓励发展的产业,以及农林牧渔业、纺织业、其他服务业等 3 个不需要鼓励发展的产业。其中,预期投入增长最快的产业为废品废料业,三种情景下的增长率均取了最大上限值,原因在于该产业实际增加值占 GDP 的比重比较低,仅为 0.35%,而增加值率^①为 58.64%,高于各行业的平均增加值率 31.25%,而增加对其的投入有助于提高 GDP。预期投入增长率最低的行业为农林牧渔业,三种情景下的增长率均低于 1%。从预期增加值比重看,提高幅度最大的是其他服务业,增幅为 1.37—2.88 个百分点,原因在于该产业的增加值率、增加值比重均较高,碳排放关联较低,增加投入可以提高经济增长又不会带来碳排放大量增加;增幅最小的是金属制品业,增幅仅为 0.03—0.05 个百分点。

① 增加值率与利润率是不同的,两者没有必然的关系。

表 4

碳减排目标下广东省产业结构优化结果

单位: %

序号	实际投入 (百亿元)	预期投入增长率			实际增加 值比重	预期比重变化(百分点)		
		情景 1	情景 2	情景 3		情景 1	情景 2	情景 3
1	47.38	0.13	0.38	0.76	4.99	-0.03	-0.05	-0.06
2	8.14	0.00	0.00	0.00	1.00	-0.01	-0.01	-0.02
3	2.89	-15.00	-20.00	-25.00	0.19	-0.03	-0.04	-0.05
4	2.90	-1.38	-2.07	-2.76	0.14	0.00	-0.01	-0.01
5	61.76	6.10	9.28	12.58	2.76	0.15	0.22	0.28
6	21.70	6.50	9.77	13.00	1.01	0.06	0.09	0.11
7	46.81	8.97	13.48	17.99	2.73	0.22	0.32	0.43
8	22.17	-6.54	-9.74	-12.99	0.86	-0.07	-0.10	-0.13
9	57.52	-3.62	-5.39	-7.13	2.34	-0.11	-0.16	-0.21
10	77.72	-5.89	-8.83	-11.77	1.53	-0.10	-0.15	-0.21
11	112.39	0.01	-0.01	-0.09	4.77	-0.03	-0.06	-0.09
12	38.14	-2.62	-3.85	-5.14	1.64	-0.05	-0.08	-0.10
13	68.30	-0.12	-0.37	-0.61	1.59	-0.01	-0.03	-0.04
14	51.35	2.22	3.27	4.28	1.94	0.03	0.04	0.05
15	51.33	6.00	9.02	12.02	2.07	0.11	0.16	0.21
16	71.14	8.00	12.02	16.05	2.65	0.19	0.28	0.37
17	130.82	6.27	9.32	12.36	4.19	0.23	0.33	0.43
18	343.19	-5.23	-8.60	-12.00	9.63	-0.57	-0.95	-1.34
19	11.21	-6.69	-10.35	-14.01	0.38	-0.03	-0.05	-0.06
20	3.30	-12.73	-19.39	-25.00	0.15	-0.02	-0.03	-0.04
21	3.43	15.00	20.00	25.00	0.35	0.05	0.07	0.08
22	54.48	0.00	0.00	0.00	2.87	-0.03	-0.04	-0.06
23	9.10	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00
24	2.21	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00
25	79.26	-6.67	-10.06	-13.45	3.32	-0.25	-0.39	-0.51
26	50.37	0.00	0.00	0.00	4.15	-0.03	-0.06	-0.08
27	127.64	-7.04	-9.86	-11.90	13.39	-1.04	-1.48	-1.83
28	269.58	5.55	9.02	12.12	28.93	1.37	2.18	2.88

注:预期增加值为根据多目标规划模型得到的值,变化率为预期增加值相比实际增加值变化的百分比,比重指各产业增加值占 GDP 的比重。

资料来源:作者根据 lingo14.0 软件结果整理。

在投入不变的前提下,鼓励一些产业发展在通过关联效应拉动其他产业发展的同时,会挤占其他产业发展所需资源,引起其他产业的投入下降;有 13 个产业的预期投入下降了,这些产业包括非金属矿及其他矿采选业、石油加工炼焦及核燃料加工业、非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业等 4 个需要限制发展的产业,以及金属矿采选业、木材加工及家具制造业、造纸印刷及文教体育用品制造业、化学工业、建筑业、批发零售和住宿餐饮业等 6 个无需限制发展的产业,甚至包括通信设备计算机及其他电子设备制造业、仪器仪表及文化办公用机械制造业、工艺品及其他制造业等 3 个需要鼓励发展的产业。其中,预期投入降幅最大的是金属矿采选业,三种情景下均为最大降幅,原因在于该产业的增加值比重较低,增加值率略高于平均水平,加上其碳排放关联大于经济关联,降低该行业的投入对经济增长的影响不大,但可降低碳排放。预期投入降幅最小的是化学工业,在情

景 1—3 下,预期投入增长率分别为 0.01%、-0.01%、-0.09%,原因在于该产业的经济关联较强,容易受到其他产业的影响,随着投入波动范围加大,限制其他产业发展导致该产业降低产出。从增加值比重看,降幅最大的是批发零售和住宿餐饮业,降幅在 1.04—1.83 百分点之间。

另外,前文选定的 5 个能源及公共基础产业的预期投入不变,表明可以在不影响这些产业发展的同时促进经济增长并降低碳排放。总的来说,从情景 1 到情景 3,随着各产业投入的波动范围逐渐扩大,预期投入增长率,预期增加值比重变化的符号基本一致,表明模拟结果具有稳健性。

3. 广东省产业结构优化前后主要经济指标的变化

在情景 1—3 下,广东省 2012 年的预期 GDP 分别比同年实际值提高 0.77%、1.38%、1.99%,预期能源消费量比同年实际值降低 0.58%、0.83%、1.06%,因产业结构调整会引起能源结构变化,降低了高碳基能源的消费比重,预期碳排放量比实际值降低 0.74%、1.08%、1.41%,均高于能源消费的降幅。预期碳强度分别比实际值降低 1.45%、2.41%、3.38%。第一产业、第二产业、工业的预期增加值提高而预期比重降低,第三产业的预期增加值与预期比重均提高(见表 5)。

表 5 广东省产业结构优化前后主要经济指标的变化

指标	优化前	优化后			变化(%)		
		情景 1	情景 2	情景 3	情景 1	情景 2	情景 3
投入(百亿元)	1826.23	1826.23	1826.23	1826.23	0.00	0.00	0.00
GDP(百亿元)	570.68	575.09	578.53	582.02	0.77	1.38	1.99
第一产业	28.47	28.51	28.58	28.69	0.14	0.39	0.77
第二产业	277.01	277.59	277.40	277.21	0.21	0.14	0.07
工业	258.10	259.93	260.40	260.84	0.71	0.89	1.06
第三产业	265.20	268.99	272.55	276.12	1.43	2.77	4.12
碳排放(百万吨)	355.08	352.46	351.25	350.08	-0.74	-1.08	-1.41
第一产业	6.35	6.35	6.37	6.39	0.00	0.31	0.63
第二产业	263.75	261.63	260.47	259.26	-0.80	-1.24	-1.70
工业	250.44	249.21	248.5	247.73	-0.49	-0.77	-1.08
第三产业	84.98	84.48	84.41	84.43	-0.59	-0.67	-0.65
能源消费(百万吨)	253.09	251.61	251.00	250.40	-0.58	-0.83	-1.06
碳强度(吨/万元)	0.62	0.61	0.61	0.60	-1.45	-2.41	-3.38
能源强度(吨/万元)	0.44	0.44	0.43	0.43	-1.13	-2.03	-2.93
限制产业比重(%)	4.90	4.73	4.63	4.54	-0.17*	-0.27*	-0.36*
鼓励产业比重(%)	27.71	28.00	28.00	28.00	0.29*	0.29*	0.29*
第一产业比重(%)	4.99	4.96	4.94	4.93	-0.03*	-0.05*	-0.06*
第二产业比重(%)	48.54	48.27	47.95	47.63	-0.27*	-0.59*	-0.91*
工业	45.23	45.20	45.01	44.82	-0.03*	-0.22*	-0.41*
第三产业比重(%)	46.47	46.77	47.11	47.44	0.30*	0.64*	0.97*

注:变化指优化后的指标值相比优化前的指标值的变化率;比重指增加值占 GDP 的比重;* 表示比重变化的百分点。

资料来源:作者整理。

五、结论与启示

1. 结论

本文从理论上分析指出,在经济增长率及降低碳排放的技术进步率不变的前提下,可以通过加快调整产业结构来实现碳减排目标。作为检验,本文基于投入产出模型计算了广东省 28 个产业的

经济关联和碳排放关联,确定了需要限制发展的4个产业和需要鼓励发展的11个产业;在此基础上,运用多目标规划模型,按照投入和最终使用减去流入的波动范围逐步递增的顺序设置了三种情景,模拟广东省在保持2012年投入不变的前提下如何通过调整产业结构达到GDP较高增长、能源消费和碳排放进一步降低的目标。研究发现:①各产业间的经济关联与碳排放关联存在差异,这为选择鼓励发展或限制发展的产业提供了可能。②第一、二产业的预期增加值提高但预期比重降低,服务业的预期增加值和预期比重均提高,模拟结果能够在一定程度上增加预期GDP和降低预期碳排放。③一些无需限制甚至个别需要鼓励发展的产业的增加值比重下降,一些无需鼓励发展的产业的增加值比重上升,但需要鼓励和限制发展的产业达到了结构调整目标。④加大产业结构调整力度有助于在促进经济增长的同时降低碳排放,从而实现保增长和调结构的双赢。

2. 启示

(1)实施产业结构优化调整时需要考虑整体效应,在统筹兼顾产业之间的经济联系与碳排放联系以及民生需求的基础上,通过精准实施差异化的产业政策,寻求合意的均衡点,从而达到同时实现调结构与保增长的双赢目标。由于各个产业的经济关联和碳排放关联存在差异且增加值率不同,增加对经济关联强、碳排放关联弱、附加值率高的产业的投入,有助于在提高经济增长率的同时不带来碳排放的大幅增加;反之,则反是。

(2)为了同时实现调结构与保增长的双重目标,需要尽可能地降低各行业的进入和退出壁垒,促进生产要素自由流动,使投入减少的产业释放出的生产要素能够迅速进入其他产业,避免要素使用率的下降。本文的模拟分析是在总投入不变、各产业的投入可在一定范围内上下浮动的基础上实现结构优化,其暗含的假设前提是生产要素可以在各产业间自由流动,不存在要素流动的障碍,所以,现实情况越接近这一假设,就越容易达到结构减碳与经济增长兼得的目标。值得注意的是,中国东部发达地区已经进入以结构减碳为主的时期,但对于中西部地区的资源型省份和东北老工业基地而言,目前可能仍然停留在以技术减碳为主的阶段,结构减碳尚未启动。从可持续发展和环境治理的角度看,结构减碳的行动越迟缓,未来的调整代价就越大,这一原理在著名的斯特恩报告^[20]中已经有所证明。鉴于此,这些地区应当尽早启动结构减碳的进程。

(3)虽然本文仅从供给角度对产业结构进行模拟,但模拟结果依赖于最终使用减去流入(含省外调入及国外进口)的调整幅度,表明在进行产业结构优化时还有必要考虑需求因素。政府可以通过政府采购、碳标签和碳普惠制等政策措施鼓励消费者消费低碳产品,促使全社会形成低碳消费方式。另外,在经济全球化时代,对外贸易、对外直接投资在产业结构优化中的作用也不容忽视。随着国内资源环境约束的收紧,以及“一路一带”战略的实施,促使高碳产业“走出去”,将腾出的资源转用于实施产业低碳化、绿色化和智能化的时机已经成熟。

【参考文献】

- [1]韩智勇,魏一鸣,范英. 中国能源强度与经济结构变化特征研究[J]. 数理统计与管理, 2004,(1):1-6.
- [2]史丹. 经济增长过程中能源利用效率的改进[J]. 经济研究, 2002,(9):49-56.
- [3]史丹. 结构变动是影响我国能源消费的主要因素[J]. 中国工业经济, 1999,(11):38-43.
- [4]赵昕,郭晶. 中国低碳经济发展的技术进步因素及其动态效应[J]. 经济学动态, 2011,(5):47-51.
- [5]林伯强,杜克锐. 理解中国能源强度的变化:一个综合的分解框架[J]. 世界经济, 2014,(4):69-87.
- [6]Hsu, G. J. Y., and F. Y. Chou. Integrated Planning for Mitigating CO₂ Emissions in Taiwan: A Multi-Objective Programming Approach[J]. Energy Policy, 2000,28(8):519-523.
- [7]薛声家. 基于投入产出模型的产业结构优化[J]. 暨南学报(哲学社会科学版), 2003,(1):49-53.
- [8]Stefański, R. L. Essays on Structural Transformation in International Economics [D]. USA:The University of Minnesota, 2009.
- [9]Grossman, G. M., and A. B. Krueger. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement[R]. NBER Working Paper, 1991.

- [10] Brock, W., and M. S. Taylor. The Green Solow Model[J]. NBER Working Paper, 2004.
- [11] Jones, L. P. The Measurement of Hirschmanian Linkage[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1976,90(2): 323-333.
- [12] 张月友. 中国的“产业互促悖论”——基于国内关联与总关联分离视角[J]. 中国工业经济, 2014,(10):46-58.
- [13] Larh, M. L. Reconciling Domestication Techniques, the Notion of Re-exports and Some Comments on Regional Accounting[J]. Economic Systems Research, 2001,13(2):165-179.
- [14] Andreosso-O'Callaghan, B., and G. Yue. Intersectoral Linkages and Key Sectors in China 1987—1997[J]. Asian Economic Journal, 2004,18(2):165-183.
- [15] 李真. 进口真实碳福利视角下的中国贸易碳减排研究——基于非竞争型投入产出模型[J]. 中国工业经济, 2014,(12):18-30.
- [16] 李博. 产业结构优化升级的综合测评和动态监测研究[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2013.
- [17] 郭广涛, 郭菊娥, 席西民, 孟磊. 西部产业结构调整节能降耗效应测算及其实现策略研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008,(4):44-49.
- [18] 齐绍洲, 付坤. 低碳经济转型中省级碳排放核算方法比较分析[J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2013,(2): 85-92.
- [19] 沈利生, 吴振宇. 出口对中国 GDP 增长的贡献——基于投入产出表的实证分析[J]. 经济研究, 2003,(11):33-41.
- [20] Stern, N. The Economics of Climate Change[J]. American Economic Review, 2008,98(2):1-37.

The Optimization of Guangdong Province's Industrial Structure under the Objective of Carbon Emissions Reduction——A Simulating Analysis Based on Input-Output Model and Multi-objective Programming Model

ZHANG Jie^{1,2}, ZHAO Xiu-juan¹

(1. College of Economics of Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. IRESO of Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: This paper theoretically proves that adjusting industrial structure could realize the carbon reducing objective under the premises of keeping economic growth rate and technical progressing rate constant. As a case, this paper estimates the economic linkages and carbon emissions linkages of 28 industries in Guangdong based on the input-output model, and chooses constrained industries group and encouraged industries group according to the differences between the two linkages. Then it applies multi-objective programming model to simulate the change of industrial structure of Guangdong in 2012 in different scenarios, and the simulating results show that Guangdong could keep inputs unchanged and realize the goals of reducing carbon emissions and promoting economic growth through implementing different industrial structure adjusting policies based on considering both carbon emissions linkages and economic linkages and that the bigger of the adjustment strength of the industrial structure, the lower of the decrement range of expected carbon emissions and the higher of the increment range of expected GDP. The main implications are giving overall consideration of the economic linkages and carbon emissions linkages, carrying out different industrial policies, and seeking desirable equilibrium to achieve the win-win situation of adjusting structure and guaranteeing economic growth simultaneously.

Key Words: carbon dioxide emissions; the optimization of industrial structure; input-output model; multi-objective programming model

JEL Classification: L52 O22 P28

[责任编辑: 章毅]