

广东省能源需求预测与 碳排放达峰路径研究

——基于混合单位能源投入产出模型

冯 烽 白重恩

摘 要 广东省是中国改革开放的先行地区和典型省份，其碳达峰的路径对于中国 2030 年实现碳达峰具有重要的研判意义。作者在编制广东省含能源实物流量能源投入产出表的基础上，基于混合单位投入产出模型和 RAS 投入产出更新技术，结合广东省的发展实际和能耗“双控”约束性指标，对广东省未来的能源需求与二氧化碳排放进行了预测。结果表明：（1）非金属矿物制品业等 5 个行业是广东省直接能耗和完全能耗的“双高”行业，建筑业则是由于高能源密度的中间投入而成为高完全能耗行业。（2）随着经济增速的回落，广东省能源需求与二氧化碳排放的达峰时间在很大程度上取决于能效改善的速度，2030 年以前能源效率改善的速度对于广东省能否如期实现既定的节能减排目标最为关键。（3）在经济增长基准情景下，如果单位 GDP 能耗年下降 3%，可于 2028 年实现碳达峰，峰值约为 62732 万吨二氧化碳；如果单位 GDP 能耗年下降 4%，则能源需求和碳排放将分别于 2027 年、2022 年达峰；相对温和的减排路径是，单位 GDP 能耗在“十三五”“十四五”“十五五”期间均下降 17%，“十六五”“十七五”期间分别下降 16%、15%，可使能源需求于 2028 年达峰，峰值约为 36806 万吨标准煤，碳排放于 2025 年达峰，峰值约为 58991 万吨二氧化碳。

关键词 能源需求预测 碳排放路径 混合单位 能源投入产出模型

[中图分类号] F206 [文献标识码] A [文章编号] 2095 - 851X (2019) 02 - 0008 - 20

【基金项目】 国家发展和改革委员会中国清洁发展机制基金项目“广东省碳排放峰值研究”（批准号：2013062）；国家自然科学基金一般项目“全球价值链视角下中国装备制造业转型升级与绿色发展耦合研究”（批准号：18BJY101）。

【作者简介】 冯烽（1980 - ），中国社会科学院数量经济与技术经济研究所副研究员、硕士生导师，邮政编码：100732；白重恩（1963 - ），清华大学经济管理学院院长、弗里曼经济学讲席教授，本文通讯作者，邮政编码：100084。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

一、引言

联合国政府间气候变化专门委员会指出，化石能源燃烧所致的大气中二氧化碳浓度渐增是全球气候变化的主要原因（IPCC，2014）。改革开放四十年来，中国经济的快速发展为全球经济增长与世界减贫事业做出了卓越贡献（万相昱、张涛，2017），同时也因消耗大量的化石能源而面临巨大的国际舆论压力。中国一直是全球应对气候变化事业的积极参与者（张莹，2017），在2014年11月发布的《中美气候变化联合声明》和2015年的巴黎气候变化大会（COP 21）上，中国均提出了“将于2030年左右使二氧化碳排放达到峰值并争取尽早实现”的国家自主贡献目标。随后，国务院发布的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》进一步要求2020年碳强度比2015年下降18%，以确保实现2030年碳排放总量达峰。事实上，中国一直致力于优化能源消费结构、提高能源使用效率，并实现了碳排放强度的持续下降（冯烽，2018）。习近平总书记在党的十九大报告中也肯定了十八大以来生态文明建设所取得的显著成效：“引导应对气候变化国际合作，成为全球生态文明建设的重要参与者、贡献者、引领者。”中国在2018年卡托维兹气候变化大会（COP 24）的积极态度再次诠释了中国的大国责任和担当。中国的碳排放达峰时间与峰值的大小在很大程度上取决于各地方政府的碳减排路径。为了如期实现碳减排“双控”目标，国务院在2016年10月发布的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》中分类确定了省级碳排放控制目标，其中要求广东等8省区在“十三五”期间碳排放强度下降20.5%。随后于2017年1月发布的《“十三五”节能减排综合工作方案》进一步对各省区提出了能耗总量和能耗强度“双控”目标，其中要求广东省在“十三五”期间能耗强度下降17%，并且对于能耗增量，要求在2015年能源消费总量30145万吨标准煤的基础上不超过3650万吨标准煤。广东作为中国改革开放的先行地区和前沿阵地，是一个人口密集、能源消耗大、经济发展活跃的典型省份，其经济社会发展阶段和资源禀赋条件在全国兼具典型性和代表性。科学预测广东省在不同发展速度和能效改善情景下的能源需求并对其碳排放路径与峰值进行预判，不仅对广东省实现既定的碳减排目标、保持经济持续健康发展具有重要的实践意义，还能为中国探索省级节能减排路径与措施积累典型经验。

迄今，已有大量研究关注中国的能源需求和碳排放预测问题，这些研究采用的建模方法主要有计量经济模型和优化模型两大类。基于计量经济模型的预测主要是通过建立碳排放与经济、人口、技术等因素之间的经验关系，并根据回归方程对给定情景下这些因素的值进行样本外推得到预测结果。代表性的文献有Auffhammer和Carson（2008）、渠慎宁和郭朝先（2010）、林卫斌等（2016）、陈占明等（2018）等。这类预测方法具有模型形式简洁、对碳排放变化的驱动因素解释力强等优点，缺点是无法解释碳排放存量的变化且中长期预测误差通常较大。基于优化模型的预测是以宏观经

济的变化和预测为背景及约束,根据各部门之间的联系或以优化能源部门的使用成本等为目标发展起来的预测方法,这类预测方法还可以依据模型中数据的逻辑关系进一步细分为自上而下型和自下而上型两种优化模型。自上而下型中国能源需求和碳排放预测模型包括 IPAC 模型 (Jiang and Hu, 2006)、中国能源投入产出模型 (Fan and Xia, 2012)、MRIO 模型 (彭水军等, 2015)、随机 3E 综合模型 (Duan et al., 2018)、多目标优化模型 (Yu et al., 2018) 等。自下而上型中国能源需求和碳排放预测模型包括 MARKAL-TIMES 模型 (Liu et al., 2011)、LEAP 模型 (Shan et al., 2012)、China TIMES 模型 (马丁、陈文颖, 2017) 等。投入产出模型、CGE 模型、宏观经济联立方程模型大多属于自上而下型,自上而下型模型通常适用于市场经济较为成熟,市场体系较为完善的宏观经济体系;自下而上型模型常用于分析技术改进及新能源给能源消费带来的影响,是对能源系统的生产和消费过程所用的技术进行描述与模拟。优化模型对基础数据的要求较高且模型的构建相对复杂,其优点是,由于考虑了经济系统中各部门之间的联系而具有较好的中长期预测效果和较强的政策模拟能力。

与国家层面能源需求预测的大量研究成果相比,有关广东省能源需求和碳排放的预测研究则较少。Xu 等 (2015) 基于 HP 滤波构建了 GM-ARMA 模型对广东省 1990—2012 年的终端能源消费量进行了样本内拟合,并预测广东省 2016 年的终端能源消费量将达到 38330.64 万吨标准煤,依据广东省 2015 年的终端能源消费量为 26215 万吨标准煤,这一结果明显高估了广东省 2016 年的终端能源消费量。匡耀求 (2015) 采用简易方法对广东省的二氧化碳排放量进行了短期的预测,认为在现行趋势情景下,2020 年广东省的二氧化碳排放量将达到 16062.46 万吨碳当量,在加快第三产业发展的情景下,广东省的二氧化碳排放量为 14568.28 万吨。王东和吴长兰 (2015) 根据 1995—2013 年广东省的二氧化碳排放量建立 GM (1, 1) 模型,预测 2020 年广东省二氧化碳排放量将高达 60688.42 万吨。Cheng 等 (2016) 构建了两区域动态 CGE 模型,分析了广东省电力部门在“十三五”节能减排目标约束下的经济影响,认为在清洁能源政策下,广东省的煤炭消费将于 2017—2019 年达峰。陈震等 (2018) 通过拟合环境库兹涅茨曲线对广东省二氧化碳排放峰值进行预测,认为在当前的低碳政策下,人均碳排放量可于 2020 年达到峰值。现有关广东省能源需求和碳排放峰值预测的研究主要是基于时间序列分析或灰色理论等单变量、非结构化的预测模型,鲜见从经济社会结构的角度构建综合模型研究广东省的能源需求和碳排放情景。这些非结构化预测模型通常在短期具有较好的预测效果,但由于缺少经济理论基础且忽略了经济社会系统中部门之间的相互联系,使得结果缺少政策含义,且中长期预测结果也难以让人信服。

广东省的地区生产总值、年末人口数、电力消费量均位居各省份之首,且其单位产出能耗位列全国先进水平,广东省能否在 2030 年以前实现碳排放达峰对于中国 2030 年达峰目标的实现具有极其重要的影响。因此,亟需构建广东省未来能源需求和碳排放的综合预测模型。考虑到投入产出模型具有良好的中长期预测效果且无需设

定 CGE 模型所需要的各种替代参数，尤其是在 CGE 模型所需的社会核算矩阵由于省级层面部分数据不可获取而无法构建的情况下，本文通过编制广东省含能源实物流量投入产出表来构建广东省能源需求和碳排放峰值综合预测模型。相对于已有研究，本文的边际贡献在于以下两方面。一是编制了广东省含能源实物流量投入产出表，并据此测算出各行业的直接综合能耗系数与完全综合能耗系数，从而识别出广东省的高能耗行业。由于混合单位能源投入产出表中的能源投入是用实物单位来表示，克服了传统价值型投入产出表中“各部门对能源消费支付相同价格”这一假设（Bullard and Herendeen, 1975）与实际不符的缺陷，测算结果也更为可靠。二是给出了一种基于混合单位能源投入产出模型的广东省能源需求预测方法，这一方法可以有效反映经济系统中各部门之间的联系及作用机制，因此具有良好的中长期预测效果，结论也有较强的政策含义。

二、模型与预测方法

（一）混合单位能源投入产出模型

能源投入产出（Energy Input-Output, EIO）模型可分为直接影响系数能源投入产出（Direct Impact Coefficient-Energy Input-Output, DIC-EIO）模型和混合单位能源投入产出（Hybrid-units Energy Input-Output, H-EIO）模型（Miller and Blair, 2009）。DIC-EIO 模型是 Leontief 模型简单且直观的扩展，它是通过 Leontief 模型的完全需求列向量左乘单位产出能耗矩阵得到全社会对能源产品的完全需求量。DIC-EIO 模型因使用简便、所需额外数据少而应用广泛（Proops, 1977; Hawdon and Pearson, 1995; Ardent et al., 2009; Fan and Xia, 2012），但 DIC-EIO 模型假定所有产业部门与最终需求部门对能源消费支付相同的价格，即假设价值型的交易与实物型的交易成比例。事实上，不同部门使用能源的价格是不同的，因而来源于能源部门的投入其实物形式与价值形式并不一致（Casler and Wilbur, 1984）。为了解决投入产出表中价格不一致的问题，Bullard 和 Herendeen（1975）在价值型投入产出表的基础上引入能源单位，将投入产出表中各部门的能源投入用实物单位表示，非能源投入量仍用价值单位表示，从而较好地克服了投入产出表中价格不一致的问题，能源价格将不再影响能源强度的计算（周平、王黎明，2011）。

H-EIO 模型是通过分块矩阵的运算来计算全社会对能源产品的完全需求量。表 1 是 n 个产品（其中前 r 个为非能源产品，后 $n-r$ 个为能源产品）部门的混合单位能源投入产出表的 I、II 象限，H-EIO 模型具有如下横向平衡关系：

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{Z}^* \mathbf{i} + \mathbf{f}^* = \mathbf{A}^* \mathbf{x}^* + \mathbf{f}^* \quad (1)$$

其中， $\mathbf{Z}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{NN} & \mathbf{Z}^{NE} \\ \mathbf{E}^{EN} & \mathbf{E}^{EE} \end{bmatrix}$ 是中间需求矩阵； $\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix}$ 是总产出列向量； $\mathbf{f}^* =$

$\begin{bmatrix} f \\ E_f \end{bmatrix}$ 是最终需求列向量; i 为元素全是 1 的列向量; $A^* = \begin{bmatrix} A^{NN} & A^{NE} \\ A^{EN} & A^{EE} \end{bmatrix}$ 是直接消耗系数矩阵, $A^{NN} = [a_{ij}^{NN}] = [z_{ij}^{NN}/x_j]_{r \times r}$, $A^{NE} = [a_{ij}^{NE}] = [z_{ij}^{NE}/e_j]_{r \times (n-r)}$, $A^{EN} = [a_{ij}^{EN}] = [e_{ij}^{EN}/x_j]_{(n-r) \times r}$, $A^{EE} = [a_{ij}^{EE}] = [e_{ij}^{EE}/e_j]_{(n-r) \times (n-r)}$, a_{ij}^{NN} 表示生产单位价值的非能源产品 j 直接消耗非能源产品 i 的价值量, a_{ij}^{NE} 表示生产单位 tce 的能源产品 j 直接消耗非能源产品 i 的价值量, a_{ij}^{EN} 表示生产单位价值的非能源产品 j 直接消耗能源产品 i 的数量 (tce), a_{ij}^{EE} 表示生产单位 tce 的能源产品 j 直接消耗能源产品 i 的数量 (tce)。

表 1 混合单位能源系统

投入 \ 产出	非能源部门(¥)	能源部门(tce)	最终需求	总产出
非能源部门(¥)	Z^{NN}	Z^{NE}	f	x
能源部门(tce)	E^{EN}	E^{EE}	E_f	E

资料来源:作者整理。

直接消耗系数矩阵 A^* 的后 $n-r$ 行 $A^E = [A^{EN} \ A^{EE}]$, 即为直接能耗系数矩阵, 其中 A^E 表示单位价值的非能源产品及单位 tce 的能源产品对能源的直接消耗量。进一步, 由于各能源产品均以 tce 为数量单位, 故将各部门对各能源品种的直接能耗系数关于能源品种求和, 可得直接综合能耗系数向量 $\alpha = i'_{n-r} A^E$, 其中向量 α 中的第 i 个分量为部门 i 的直接综合能耗系数, $i'_{n-r} = [1, 1, \dots, 1]_{1 \times (n-r)}$ 。

由式 (1) 可得最终需求 f^* 与完全需求量 x^* 的关系:

$$x^* = (I - A^*)^{-1} f^* = L^* f^* \tag{2}$$

其中, $L^* = \begin{bmatrix} L_{11}^* & L_{12}^* \\ L_{21}^* & L_{22}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r - A^{NN} & -A^{NE} \\ -A^{EN} & I_{n-r} - A^{EE} \end{bmatrix}^{-1}$, 为混合单位 Leontief 逆矩阵 (陈锡康等, 2011)。

由于能源产品分为一次能源和二次能源, 当经济系统中只有一次能源时, $[L_{21}^* \ L_{22}^*]$ 就是各部门的能源完全需求系数; 当经济系统中有二次能源时, 以 $[L_{21}^* \ L_{22}^*]$ 作为各部门能源完全需求系数将被严重高估, 原因是混合单位 Leontief 逆矩阵 L^* 中对于二次能源产品的需求已经全部包含在对一次能源产品的需求中, 如果直接将一次能源的完全消耗与二次能源的完全消耗相加, 将造成能源产品的重复计算。为了消除这一问题, 本文参考陈锡康等 (2011) 的方法计算完全能耗系数矩阵 $T^E = [T^{EN} \ T^{EE}]$ 来代替 $[L_{21}^* \ L_{22}^*]$ 。对于非能源产品, 完全能耗系数等于直接能耗加上通过消耗非能源产品对能源的各种间接消耗, 再加上非能源产品消耗的能源产品在生产过程中对非能源产品的消耗中所造成的对能源的间接消耗:

$$\begin{aligned} T^{EN} &= A^{EN} + (A^{EN}A^{NN} + A^{EN}A^{NE}A^{EN}) + A^{EN}(A^{NN} + A^{NE}A^{EN})^2 + \dots \\ &= A^{EN}(I - A^{NN} - A^{NE}A^{EN})^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

其中，等号右端第一项 A^{EN} 表示非能源产品的直接能耗；第二项 $A^{EN}A^{NN} + A^{EN}A^{NE}A^{EN}$ 中的 $A^{EN}A^{NN}$ 表示非能源产品通过消耗非能源产品对能源的消耗， $A^{EN}A^{NE}A^{EN}$ 表示非能源产品直接消耗的能源产品在生产过程中消耗的非能源产品对能源的消耗，两者之和即为非能源产品通过消耗能源和非能源产品的第一次间接能耗；第三项 $A^{EN}(A^{NN} + A^{NE}A^{EN})^2$ 表示非能源产品通过消耗能源和非能源产品的第二次间接能耗。

对于能源产品，其完全能耗系数等于能源产品在生产过程中直接消耗的能源与通过消耗非能源产品而产生的间接能耗：

$$T^{EE} = A^{EE} + T^{EN}A^{NE} \quad (4)$$

其中，等号右端第一项 A^{EE} 表示能源产品生产过程中对能源的直接消耗，第二项 $T^{EN}A^{NE}$ 表示能源产品生产过程中通过消耗非能源产品对能源的间接能耗。

由此，得到完全能耗系数矩阵为：

$$T^E = [T^{EN} \quad T^{EE}] \quad (5)$$

进一步，将各部门对各能源品种的完全能耗系数关于能源品种加总可得完全综合能耗系数向量：

$$\beta = i'_{n-r} T^E \quad (6)$$

其中，向量 β 中的第 i 个分量为部门 i 的完全综合能耗系数。

用完全综合能耗系数 β 左乘式 (2) 的完全需求量 x^* 即可得到为满足最终需求 f^* 所需的总产出 x^* 对应的能源需求总量：

$$H = \beta x^* \quad (7)$$

式 (7) 两端再左乘单位能源二氧化碳排放系数可得相应的二氧化碳排放量：

$$C = \eta'_{n-r} \beta x^* \quad (8)$$

其中， η_{n-r} 为各分能源折标准煤系数组成的 $(n-r) \times 1$ 列向量。

(二) 能源需求与碳排放预测方法

本文通过编制 2015 年含能源实物流量的能源投入产出表，采用 RAS 法进行逐年更新，根据式 (6) ~ (8) 和未来发展情景逐年计算广东省的能源需求与碳排放预测值，步骤如下。

步骤 1：编制 2015 年广东省以 2005 年价格为基础的含能源实物量的价值型投入产出表。

在原价值型投入产出表 1、2 象限的基础上，增加行向量表示能源产品在各部门的投入量。对非能源部门来说，能源产品的投入量 (E^{EN}) 等于该部门的能源终端消

费量；对能源生产与加工业而言，能源产品的投入量（ E^{EE} ）等于该部门的能源终端消费量加上加工、转换的投入量，最终消费的能源实物量等于居民部门的终端能源消费量，资本形成总额的能源实物量等于能源库存的增量，流出的能源实物量等于能源出口量、本省能源调出量、外国轮船与飞机在本省的加油量之和，流入的能源实物量等于能源进口量、外省能源调入量、本省轮船与飞机在省外的加油量之和，其他的能源实物量等于损失量与平衡差额之和。能源产品总产出的计算遵循《中国能源统计年鉴》能源平衡统计中的生产与分配关系。

表2 广东省含能源实物流量的能源投入产出表

投入		产出		中间使用				中间产出合计	最终使用					总产出
				非能源部门			能源部门		最终消费	资本形成总额	流出	流入	其他	
				农林牧渔业	...	其他服务业	能源生产与加工业							
中间投入	非能源部门	农林牧渔业(¥)	Z^{NN}			Z^{NE}	τ^N	f^N					x_i^N	
		...												
		其他服务业(¥)												
	能源部门	能源生产与加工业(¥)	Z^{EN}	Z^{EE}	τ^E	f^E					x_i^E			
能源生产与加工业(tce)		E^{EN}	E^{EE}	ϵ^E	E^{EF}					E				
中间投入合计(¥)		σ^N			σ^E									
增加值(¥)		v^N			v^E									
总投入(¥)		x_j^N			x_j^E									

资料来源：作者整理。

步骤2：由给定 t 期的含能源实物流量能源投入产出表和 $t+1$ 期的经济发展情景（对于2016年使用实际经济数据），包括GDP增速、各行业增加值占全省GDP的比值，推算 $t+1$ 期的中间投入、总投入、总产出、中间产出。具体计算方法如下。

步骤2.1：根据 $t+1$ 期全省GDP增速、三次产业结构比例的情景值以及 t 期投入产出表中第二、三产业各细分行业的增加值占比，按比例推算 $t+1$ 期23个行业增加值的情景值 $[\hat{v}_{t+1}^N \ \hat{v}_{t+1}^E]$ 。

步骤2.2：根据 t 期行业增加值 $[v_i^N \ v_i^E]$ 与行业中间投入合计 $[\sigma_i^N \ \sigma_i^E]$ 的比例关系，由 $t+1$ 期的行业增加值 $[\hat{v}_{t+1}^N \ \hat{v}_{t+1}^E]$ 推算出 $t+1$ 期的行业中间投入合计 $[\hat{\sigma}_{t+1}^N \ \hat{\sigma}_{t+1}^E]$ ，进而根据总投入 = 中间投入合计 + 增加值，得 $t+1$ 期的行业总投入 $[\hat{x}_{j,t+1}^N \ \hat{x}_{j,t+1}^E]$ 。

步骤2.3：根据行业总投入 = 行业总产出，得到 $t+1$ 期的行业总产出 $\begin{bmatrix} \hat{x}_{i,t+1}^N \\ \hat{x}_{i,t+1}^E \end{bmatrix}$ 。

步骤2.4：根据 t 期的行业中间产出合计 $\begin{bmatrix} \tau_i^N \\ \tau_i^E \end{bmatrix}$ 与行业总产出 $\begin{bmatrix} x_{i,t}^N \\ x_{i,t}^E \end{bmatrix}$ 的比例关系，由

$t+1$ 期的行业总产出 $\begin{bmatrix} \hat{x}_{i,t+1}^N \\ \hat{x}_{i,t+1}^E \end{bmatrix}$ 推算出 $t+1$ 期的行业中间产出合计 $\begin{bmatrix} \hat{\tau}_{t+1}^N \\ \hat{\tau}_{t+1}^E \end{bmatrix}$ 。

步骤 3：由 $t+1$ 期的行业中间投入合计 $[\hat{\sigma}_{t+1}^N \quad \hat{\sigma}_{t+1}^E]$ 和中间产出合计 $\begin{bmatrix} \hat{\tau}_{t+1}^N \\ \hat{\tau}_{t+1}^E \end{bmatrix}$ ，

采用 RAS 法更新得到 $t+1$ 期价值型投入产出表的中间流量 $\begin{bmatrix} \hat{z}_{t+1}^{NN} & \hat{z}_{t+1}^{NE} \\ \hat{z}_{t+1}^{EN} & \hat{z}_{t+1}^{EE} \end{bmatrix}$ 。RAS 法的思想是用计算年中间需求合计作为行向控制量，计算年中间投入合计作为列向控制量，对基年中间投入结构进行修正，从而得到计算年投入产出表的中间流量。限于篇幅，RAS 法详见陈锡康等（2011）。

步骤 4：按 t 期能源价值量 $[Z_i^{EN} \quad Z_i^{EE} \quad f_i^E \quad x_{i,t}^E]$ 与实物量 $[E_i^{EN} \quad E_i^{EE} \quad E_i^{EF} \quad E_i]$ 的比例关系和各行业能效改善的情景值，推算出 $t+1$ 期能源实物流量 $[\hat{E}_{t+1}^{EN} \quad \hat{E}_{t+1}^{EE} \quad \hat{E}_{t+1}^{EF} \quad \hat{E}_{t+1}]$ ，进而得到 $t+1$ 期的含能源实物流量能源投入产出表。

步骤 5：由上得到的 $t+1$ 期含能源实物流量能源投入产出表，计算出 $t+1$ 期的行业直接综合能耗系数 $\hat{\alpha}_{t+1}$ ；根据式（3）~（6）计算出 $t+1$ 期的行业完全综合能耗系数 $\hat{\beta}_{t+1}$ 。

步骤 6：由 $t+1$ 期完全综合能耗系数 $\hat{\beta}_{t+1}$ 和混合单位总产出 $\hat{x}_{t+1}^* = \begin{bmatrix} \hat{x}_{i,t+1}^N \\ \hat{E}_{t+1} \end{bmatrix}$ ，据式

（7）得出 $t+1$ 期全省的能源需求量 \hat{H}_{t+1} ；再由 $t+1$ 期能源碳排放因子并据式（8）得到 $t+1$ 期全省能源需求所致的二氧化碳排放量 \hat{C}_{t+1} 。

用上一年推算出来的含能源实物量价值型投入产出表，重复如上步骤 2~步骤 6，依次获得 2016—2040 年广东省的能源需求量和二氧化碳排放量。

三、数据说明与情景设置

（一）数据来源与说明

本文数据主要来自广东省统计局发布的 2015 年投入产出延长表、《中国能源统计年鉴 2016》中的广东省能源平衡表以及《广东统计年鉴 2016》。

广东省能源平衡表中各种以实物单位计量的能源量，本文按照 IPCC（2006）的方法，用各种能源的实物量分别乘以相应的能源折标准煤系数来计算。除型煤、其他焦化产品的折标准煤系数来源于世界资源研究所出版的《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南（2.1 版）》之外，其余各能源的折标准煤系数均来源于国家统计局能源统计司编制的《中国能源统计年鉴》。

由于广东省能源平衡表对终端能源消费中未按工业行业进行细分，为此，本文将广东省能源平衡表中的工业终端能源使用量按当年《广东统计年鉴》的工业分行业

终端能源消费量占工业（不含能源生产与加工行业）终端能源使用量的比例进行拆分。考虑到现有关于碳排放路径研究多以2005年的价格水平来计算，为了剔除价格变动因素的影响和便于进行结果的比较，本文利用广东省生产总值指数采用单缩减法（吴开尧等，2014）对现价能源投入产出表进行价格平减，得到以2005年不变价计算的广东省2015年含能源实物流量的能源投入产出表。

用能源折标准煤系数乘以能源实物量计算得到的能源消耗量为电热当量法能耗值，而《广东统计年鉴》中的分行业能源消费总量采用的是发电煤耗法进行计量，并且国务院《“十三五”节能减排综合工作方案》中关于广东省“十三五”的能耗总量控制指标也是以发电煤耗法来计量。为了避免统计口径不一致的问题，本文根据《广东统计年鉴》公布的2015年广东省能源消费总量（发电煤耗计算法值）30145万吨标准煤与我们根据广东省能源平衡表计算得到的广东省能源消费总量（电热当量计算法值）26215万吨标准煤之比（1.1499:1），将以电热当量法计量的能源需求量转换为以发电煤耗法计量的能源需求量。

由于投入产出表和能源统计年鉴的部门分类不一致，参考《国民经济行业分类与代码》，以能源统计年鉴中行业部门分类为基准，编制广东省23个部门（22个非能源部门和1个能源部门）含能源实物流量的能源投入产出表。由于《广东统计年鉴》的工业分行业终端能源消费量并未将总消费量细分到具体的能源品种，无法得到工业分行业终端消费的细分能源数据，因此本文将投入产出表中的煤炭采选产品、石油和天然气开采产品、石油炼焦产品和核燃料加工品、电力热力的生产和供应、燃气生产和供应这5个能源产品部门合并为能源生产与加工业。如前所述，据式（3）~（5）计算的完全能耗系数并不会因为能源部门的合并造成能源使用的重复计算，从而不会影响能源需求量的计算结果。

表3 广东省能源投入产出表与价值型投入产出表部门对应代码

本文编制的能源投入产出表部门名称	部门代码	投入产出表中对应的行业代码
农林牧渔业	01	01
金属矿采选业	02	04
非金属矿采选业	03	05
食品制造及烟草加工业	04	06
纺织业	05	07
纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	06	08
木材加工及家具制造业	07	09
造纸印刷及文教体育用品制造业	08	10
化学工业	09	12
非金属矿物制品业	10	13
金属冶炼及压延加工业	11	14
金属制品业	12	15

续表

本文编制的能源投入产出表部门名称	部门代码	投入产出表中对应的行业代码
通用、专用设备制造业	13	16、17
交通运输设备制造业	14	18
电气机械及器材制造业	15	19
通信设备、计算机及其他电子设备制造业	16	20
其他制造业	17	21 ~ 23
水的生产和供应业	18	27
建筑业	19	28
交通运输、仓储和邮电通信业	20	30、32
批发和零售贸易餐饮业	21	29、31
其他行业	22	33 ~ 42
能源生产与加工业	E	02、03、11、25、26

注：投入产出表中的“金属制品、机械和设备修理服务（原行业代码 24）”的生产与分配流量按比例拆分至“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”“通信设备、计算机及其他电子设备制造业”“其他制造业”中。

资料来源：作者整理。

（二）情景设置

1. 广东省未来 GDP 增速及产业结构的情景设定

白重恩和张琼（2017）基于可比经济体的跨国收敛规律、中国人口结构自身特征估计了中国未来的潜在经济增长率：2016—2020 年、2021—2025 年、2026—2030 年、2031—2035 年与 2036—2040 年分别为 6.28%、5.57%、4.82%、3.94% 和 3.40%。本文以白重恩和张琼（2017）对中国未来各时间区间的潜在经济增长率的估计均值作为广东省相应时间区间末年的经济增长率，设置高增长情景，并以该值作为广东省相应时间区间首年的经济增长率，设置低增长情景，取高增长情景与低增长情景的均值作为广东省相应年份的基准增长情景。

广东省三次产业比重由 2010 年的 4.97:49.57:45.46 调整为 2018 年的 3.94:41.83:54.23^①。2011—2018 年美国、英国、法国、日本、新加坡等发达国家服务业增加值占本国 GDP 比重的均值分别为 76.48%、70.78%、70.30%、70.39%、70.01%^②。广东省人均 GDP 于 2014 年突破 1 万美元，处于世界中高收入国家的较高水平。参考发达国家第三产业占比及广东省是中国经济发展活跃省份的现况，本文各情景均设定广东省的三次产业结构在 2020 年为 3.20:40.00:56.80，2040 年为 2.50:25.50:72.00，其余年份通过线性插值设定。

① 根据《2018 年广东国民经济和社会发展统计公报》中广东省 2018 年三次产业的增加值进行计算。

② 根据 Wind 金融终端全球宏观经济数据库中世界银行的统计数据计算。

表4 主要年份经济增速和产业结构的情景值

单位: %

项目	年份	GDP 增速			产业结构		
		基准情景	高情景	低情景	一产占比	二产占比	三产占比
实际值	2016	7.54	同基准 情景	同基准 情景	4.65	43.23	52.13
	2017	7.50			4.03	42.37	53.60
	2018	6.80			3.50	41.50	55.00
情景值	2020	6.10	6.40	5.80	3.20	40.00	56.80
	2025	5.20	5.57	4.82	2.97	36.32	60.71
	2030	4.38	4.82	3.94	2.82	32.71	64.47
	2035	3.67	3.94	3.40	2.66	29.11	68.24
	2040	3.10	3.40	2.80	2.50	25.50	72.00

资料来源:作者设定。

2. 广东省未来能效改善的情景设定

过去二十多年里,广东省的能耗强度得到了显著改善,单位 GDP 能耗由 1995 年的 0.9200 吨标准煤/万元逐年下降至 2015 年的 0.4211 吨标准煤 1 万元,年均下降 3.83%^①。本文根据广东省能效改善的历史趋势,结合国务院《“十三五”节能减排综合工作方案》对广东省提出“十三五”期间能耗强度下降 17% 的要求,同时,考虑到 2021—2030 年是实现碳排放达峰的关键期,设置 4 种能效改善情景^②。能效改善情景 1,各行业单位增加值能耗每年下降 2%;能效改善情景 2,各行业单位增加值能耗每年下降 3%;能效改善情景 3,各行业单位增加值能耗每年下降 4%;能效改善情景 4 (能效规划情景),各行业单位增加值能耗“十三五”“十四五”“十五五”期间均下降 17% (年均下降 3.66%),“十六五”期间下降 16% (年均下降 3.43%),“十七五”期间下降 15% (年均下降 3.20%)。

3. 广东省未来单位标准煤二氧化碳排放量的情景设定

由于没有工业分行业的能源消费结构数据,无法直接做出与能源结构优化相关的碳排放情景分析,对此,本文分别测算出广东省历年的能源消费总量和相应的二氧化碳排放总量,计算得到历年单位标准煤碳排放系数^③,广东省的单位标准煤碳排放系数由 2011 年的 2.4125 吨二氧化碳/tce 逐年下降至 2015 年的 2.1182 吨二氧化碳/tce,年均下降 0.0736 吨二氧化碳/tce。这表明广东省的能源消费结构正在优化,同时考虑到能源消费结构边际优化程度递减的规律,设广东省单位标准煤碳排放系数的未来

① 作者计算,计算方法和结果备索,GDP 按 2005 年不变价计算。

② “各行业单位增加值能耗下降比例相同”这一假设无疑过强,在缺乏明确的各行业能效改善依据的情况下,暂做此假设。

③ 作者计算,计算方法和结果备索。

情景如下：2016—2020年由2.1182逐步下降至1.98；2020—2030年由1.98逐步下降至1.85；2030—2040年由1.85逐步下降至1.75。本文将预测得到的能源需求量乘以同年单位标准煤碳排放系数的情景值得到二氧化碳排放的预测值。

四、计算结果与分析

（一）广东省行业直接综合能耗系数和完全综合能耗系数

表5列出了2015年广东省分行业直接综合能耗系数和完全综合能耗系数的计算结果。从直接综合能耗系数看，非金属矿物制品业，水的生产和供应业，交通运输、仓储和邮电通信业，金属冶炼及压延加工业，化学工业，纺织业，金属矿采选业，造纸印刷及文教体育用品制造业依次位居广东省非能源行业直接综合能耗系数的前列，这些行业单位产出需要直接消耗的能源数量较大。如非金属矿物制品业，由于该行业的主要产品包括玻璃、陶瓷、石材等，这些产品的生产工艺过程需要直接消耗大量的能源，同时这些产品所需的原材料的价值通常较低，这是该产品行业直接综合能耗系数大的原因。金属制品业，其他行业，交通运输设备制造业，通信设备、计算机及其他电子设备制造业的直接综合能耗系数在广东省各行业中则较小，这些行业的总产值中非能源产品的投入占的比重较大，因此这些行业的直接综合能耗系数较低。

从完全综合能耗系数看，居2015年广东省行业完全综合能耗系数前五位的依次是非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业、化学工业、纺织业、造纸印刷及文教体育用品制造业，它们的完全综合能耗系数分别为1.0142、0.7197、0.6101、0.5830、0.5610吨标准煤/万元，每万元的总产出需要直接和间接消耗的能源量均超过0.5吨标准煤。由于完全综合能耗系数是直接消耗的能源和通过各种中间投入品所间接消耗的能源之和，它比直接综合能耗系数更全面地反映部门对能源的依赖程度，因此，这些完全综合能耗系数高的行业是广东省节能减排需要重点监控的行业。此外，注意到各部门的完全综合能耗系数均高于直接综合能耗系数，进一步考察各部门完全综合能耗系数与直接综合能耗系数的比值可发现，一些行业虽然直接综合能耗系数较小，但其完全综合能耗系数很大，如金属制品业、交通运输设备制造业、电气机械及器材制造业、建筑业的完全综合能耗系数是直接综合能耗系数的数倍之多，其原因是这些行业还需要消耗大量能源密度大的中间产品作为其投入品，因此，导致了这些产业部门的完全综合能耗系数远高于其直接综合能耗系数。如建筑业，其本身的直接能耗并不高，但由于该行业需要使用大量的钢材及化工材料，从而完全综合能耗系数很大。这一结果表明，各产业部门之间的相互关联关系和技术进步的外部性，使得一个产业部门能源效率的提高不仅会改善本产业部门的能源消耗，同时也会对其上、下游行业的能源消耗产生影响，这也是综合系统模型在进行中长期预测中比单方程计量模型更为有效的原因之一。

表5 2015年广东省分行业直接综合能耗系数、完全综合能耗系数

产业部门	直接综合 能耗系数	完全综合 能耗系数	产业部门	直接综合 能耗系数	完全综合 能耗系数
非金属矿物制品业	0.5693(1)	1.0142(1)	其他制造业	0.0549(16)	0.3689(13)
金属冶炼及压延加工业	0.2459(4)	0.7197(2)	木材加工及家具制造业	0.0617(14)	0.3551(14)
化学工业	0.2298(5)	0.6101(3)	通用、专用设备制造业	0.0453(17)	0.3494(15)
纺织业	0.2063(6)	0.5830(4)	交通运输设备制造业	0.0352(20)	0.3387(16)
造纸印刷及文教体育用品 制造业	0.1522(8)	0.5610(5)	非金属矿采选业	0.0931(9)	0.3207(17)
建筑业	0.0632(13)	0.5019(6)	通信设备、计算机及其他 电子设备制造业	0.0391(19)	0.3032(18)
水的生产和供应业	0.2980(2)	0.4896(7)	食品制造及烟草加工业	0.0742(11)	0.2848(19)
交通运输、仓储和邮电通 信业	0.2964(3)	0.4639(8)	批发和零售贸易餐饮业	0.0754(10)	0.1852(20)
金属制品业	0.0225(22)	0.4206(9)	农林牧渔业	0.0741(12)	0.1787(21)
金属矿采选业	0.1662(7)	0.4205(10)	其他行业	0.0245(21)	0.1233(22)
电气机械及器材制造业	0.0443(18)	0.4042(11)	能源生产与加工业	0.2884	0.3143
纺织服装鞋帽皮革羽绒及 其制品业	0.0571(15)	0.3701(12)			

注：括号内的数值为能耗系数的行业排名，表中按行业完全综合能耗系数的大小降序排列；非能源行业综合能耗系数的单位为吨标准煤/万元，能源生产与加工业综合能耗系数的单位为吨标准煤/吨标准煤；由于能源行业的综合能耗系数与非能源行业相应指标的单位不同，因此能源生产与加工业不参与排序。

资料来源：作者计算。

(二) 广东省能源需求与碳排放预测

四种能效改善情形下广东省2016—2040年不同经济增速下的能源需求显示（见图1和表6），如果各行业单位增加值能耗年降2%，基准情景、高增长情景和低增长情景下广东省的能源需求均无法于2030年以前达峰。如果各行业单位增加值能耗年降3%，经济高增长情景下广东省的能源需求将于2034年达峰；基准情景下广东省的能源需求将于2032年达峰，峰值约为39954万吨标准煤；经济低增长情景下将于2029年达峰，峰值为38287万吨标准煤。如果各行业单位增加值能耗年降4%，基准情景、高增长情景和低增长情景下广东省的能源需求均能在2030年以前达峰，达峰时间分别为2027年、2029年、2025年，峰值分别约为35516万吨标准煤、36717万吨标准煤、34669万吨标准煤。在政府能效规划情形下，经济高增长情景下广东省的能源需求将无法在2030年以前达峰；基准情景下广东省的能源需求将于2028年达峰，峰值约为36807万吨标准煤；低增长情景下将于2026年达峰，峰值约为35721万吨标准煤。

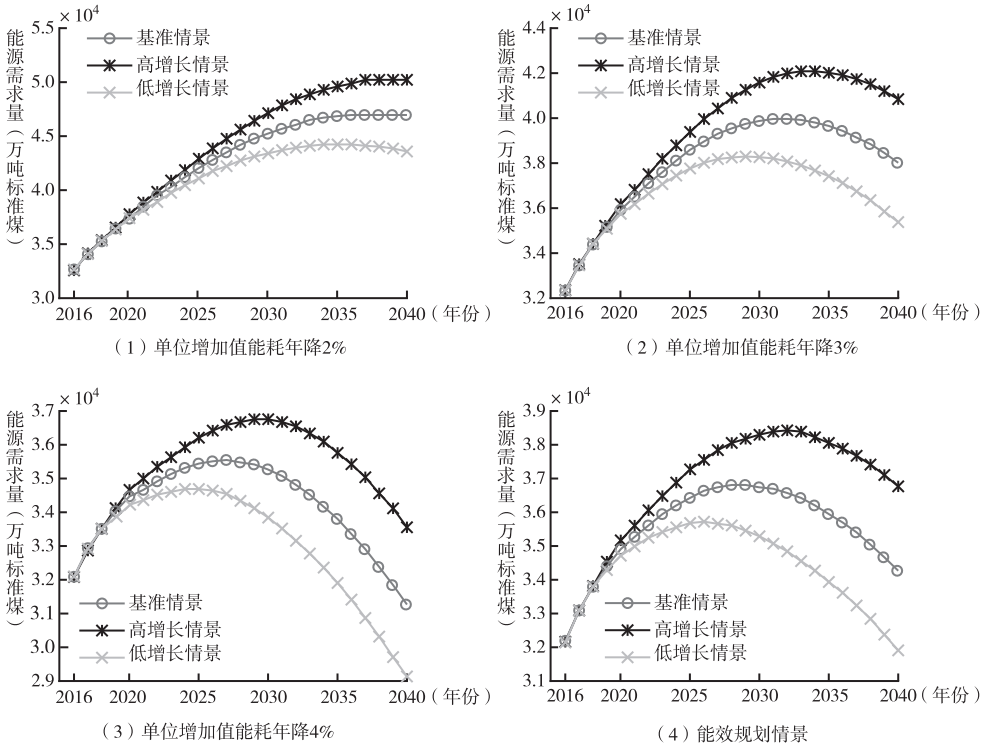


图 1 四种能效改善情景下广东省 2016—2040 年能源需求曲线

资料来源：作者绘制。

表 6 不同情景下广东省能源需求的峰值与达峰时间

单位：万吨标准煤

峰 值 与 年 份 GDP 增速 \ 能 效 改 善	(1)单位增加值 能耗年降 2%	(2)单位增加值 能耗年降 3%	(3)单位增加值 能耗年降 4%	(4)能效规划情景
情景 A(基准情景)	46983.68 (2037 年)	39954.80 (2032 年)	35516.76 (2027 年)	36806.71 (2028 年)
情景 B(高增长情景)	50205.14 (2039 年)	42034.46 (2034 年)	36717.38 (2029 年)	38414.38 (2032 年)
情景 C(低增长情景)	44206.94 (2035 年)	38287.97 (2029 年)	34669.04 (2025 年)	35721.01 (2026 年)

注：表中的能源需求总量为发电煤耗计算法值。

资料来源：作者计算。

从能源需求的增量看，表 7 列出了不同情景下广东省“十三五”期间的能源需求增量。可以看到，单位增加值能耗年下降 2%、3%、4% 以及能效规划情景下，

“十三五”期间的能源需求量增量均超过了3650万吨标准煤；在单位增加值能耗年均下降5%情形下，广东省方可实现《“十三五”节能减排综合工作方案》中“十三五”期间增量不超过3650万吨标准煤的总量控制要求。

表7 不同情景下广东省“十三五”期间能源需求增量

单位：万吨标准煤

需求增量 GDP增速	能效改善	(1)单位	(2)单位	(3)单位	(4)能效	(5)单位
		增加值 能耗年降2%	增加值 能耗年降3%	增加值 能耗年降4%	规划情景	增加值 能耗年降5%
情景A(基准情景)		7387.37	5795.63	4271.95	4785.53	2813.90
情景B(高增长情景)		7634.99	6032.75	4499.02	5015.99	3031.35
情景C(低增长情景)		7140.55	5559.28	4045.62	4555.82	2597.15

资料来源：作者计算。

表8汇总了12种情景下广东省二氧化碳排放达峰的时间与峰值^①，图2描绘了广东省2016—2040年不同经济增速下的二氧化碳排放路径。表8和图2显示，如果各行业单位增加值能耗年降2%，基准情景、高增长情景和低增长情景下广东省的二氧化碳排放均无法于2030年以前达峰。如果各行业单位增加值能耗年降3%，在经济高增长情景下广东省的二氧化碳排放无法在2030年以前达峰；基准情景下广东省的二氧化碳排放将于2028年达峰，峰值约为62732万吨；经济低增长情景下将于2026年达峰，峰值约为61029万吨。如果各行业单位增加值能耗年降4%，基准情景、高增长情景和低增长情景下广东省的二氧化碳排放均可于2025年以前达峰，达峰时间分别为2022年、2025年、2018年，峰值分别约为57560万吨、58567万吨、57411万吨。在能效规划情形下，基准情景、高增长情景和低增长情景下广东省的二氧化碳排放达峰时间分别为2025年、2027年、2022年，峰值分别约为58991万吨、60441万吨、58066万吨。尽管能源需求和二氧化碳排放二者之间保持着大致相同的变化趋势，但二氧化碳排放将早于能源需求达到峰值，原因是产业结构与能源结构的优化使得单位能源二氧化碳排放量随之下降，进而有利于加快碳排放达峰。

鉴于当前全球经济所面临的风险和困难增多，主要经济体增长放缓、通胀上升，同时考虑到国内经济正处于增长速度换挡期，基准情景更贴合于广东省经济发展的实际和未来的发展情景，因此，本文重点考察经济增长基准情景下广东省的能源需求与二氧化碳排放趋势。在国家2030年碳排放达峰目标下，广东省作为中国的先进省份，

^① 尽管就二氧化碳的来源而言，其产生途径包括含碳燃料的燃烧、工业品生产过程中的化学反应、人类及生物的呼吸过程、有机物的分解发酵过程等。此外，森林植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳，并将其固定在植被中，可有效降低二氧化碳在大气中的浓度。化石能源等含碳燃料的燃烧是导致空气中二氧化碳浓度变化的最主要原因，故本文仅考虑化石能源燃烧所致的二氧化碳排放。

无疑要早于2030年实现碳排放达峰。在基准情景的经济增速下，广东省要在2030年之前实现碳排放达峰尚需努力，单位GDP能耗在“十三五”、“十四五”和“十五五”期间均分别至少下降16%方能确保在2030年以前实现二氧化碳排放达峰，这一能效规划目标能否达成将是广东省能否在2030年之前实现碳排放达峰的关键。

表8 不同情景下广东省二氧化碳排放的峰值与达峰时间

单位：万吨

峰 值 与 年 份 GDP 增速	能 效 改 善			
	(1)单位增加值 能耗年降2%	(2)单位增加值 能耗年降3%	(3)单位增加值 能耗年降4%	(4)能效 规划情景
情景 A(基准情景)	71561.27 (2034年)	62732.68 (2028年)	57560.36 (2022年)	58991.70 (2025年)
情景 B(高增长情景)	75674.85 (2035年)	65122.11 (2031年)	58567.88 (2025年)	60441.34 (2027年)
情景 C(低增长情景)	68029.95 (2031年)	61029.79 (2026年)	57411.48 (2018年)	58066.51 (2022年)

资料来源：作者计算。

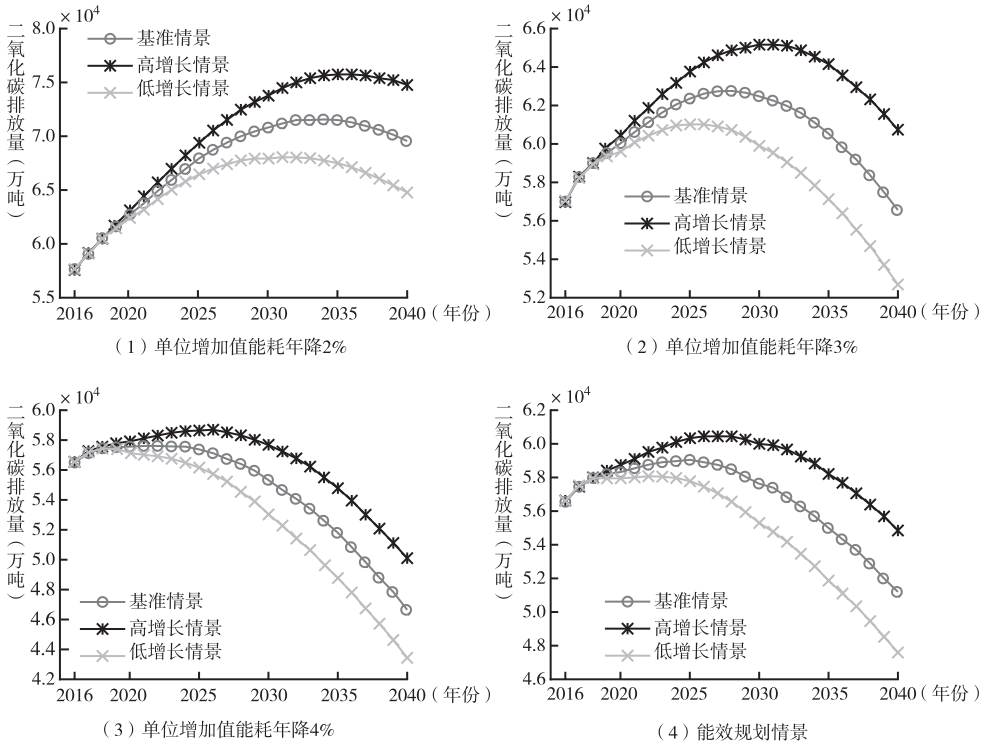


图2 四种能效改善情景下广东省2016—2040年二氧化碳排放路径

资料来源：作者绘制。

为检验模型预测结果的有效性,将本文计算得到的预测结果与已有研究进行对比。本文基准情景下广东省2016年的能源需求为32189万吨标准煤,这一结果低于Xu等(2015)得到的38330万吨标准煤终端能源需求预测结果,可能的原因是,后者以单个时间序列数据进行拟合,并且其样本期为1990—2012年的经济高速增长期,从而高估了2016年的实际能源需求。匡耀求(2015)采用简易方法预测广东省的二氧化碳排放量将于2020年达峰,峰值为14568.28万吨碳当量,该值乘以碳转换系数44/12得到二氧化碳排放约为58895万吨,这一结果与本文基准情景且能耗按规划情景改善的情形所得结果58991万吨基本一致,但广东省在2020年实现碳达峰这一结论过于乐观。本文的预测结果合理显示了模型的适用性。

五、研究结论与启示

本文基于混合单位投入产出模型测算了2015年广东省各行业的完全综合能耗系数,并借助投入产出表RAS更新技术给出了能源需求与二氧化碳排放的预测方法,进而结合广东省经济社会发展情景预测了广东省未来的能源需求与二氧化碳达峰时间,结论如下。(1)现阶段广东省的高能耗行业主要是非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业、化学工业、纺织业、造纸印刷及文教体育用品制造业、建筑业。其中,非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业、化学工业、纺织业、造纸印刷及文教体育用品制造业均为直接能耗和完全能耗“双高”行业,建筑业则由于需要使用大量钢材及化工材料等高能源密度的中间投入,间接能耗高而成为高能耗行业。(2)在经济增长基准情景下,能源需求与二氧化碳排放的达峰时间在很大程度上依赖于能效改善的速度。如果单位GDP能耗年下降4%,则能源需求与二氧化碳排放将分别于2027年和2022年达峰;如果单位GDP能耗在“十三五”“十四五”“十五五”期间均下降17%,则广东省的能源需求将于2028年达峰,峰值为36806.71万吨标准煤,二氧化碳排放将于2025年达峰,峰值为58991.70万吨。(3)2030年以前能源效率改善的速度对于广东省能否如期实现既定的节能减排目标最为关键。能源需求和二氧化碳排放达峰时间与峰值是经济增速、产业结构变化、能源效率改善速度和能源结构优化等一系列因素共同影响的结果。全球经济增长放缓、中国经济进入新常态以及稳中求进的工作总基调决定了广东省未来经济增速保持高增长情景的可能性不大,同时产业结构优化与升级的方向也不会改变,短期内要改变能源消费结构难度较大,因此,提高能源效率将是广东省节能减排工作的重要抓手。(4)在经济新常态下,广东省经济增速的放缓阶段性地减轻了实现节能减排既定目标的压力,但在完成工业化和全省实现全面小康以前,广东省的节能减排工作仍然任重道远。在经济高速增长这一情景下,广东省的单位GDP能耗年下降不能低于3%,否则将无法确保二氧化碳排放于2030年以前达峰。

由上述研究结论,提出以下建议。(1)大力推进高能耗行业结构调整。以钢

铁、水泥、平板玻璃、陶瓷、化工、印染、造纸等高能耗、高污染行业为重点，淘汰这些行业中能耗、环保不达标企业。这些行业大多属于产能过剩行业，对这些行业予以严格常态化执法和实施强制性标准，可以达到降能耗、去产能的双重功效。(2) 加快提高工业领域能源利用效率。通过加大工业领域节能技术的研发投入，促进工业领域广泛采用先进节能技术，尤其是化学原料、化学制品、橡胶和塑料制品、纺织服装、设备制造等产值占比高的行业，着力提升这些行业的能源利用效率，降低单位产值能耗和二氧化碳排放。(3) 积极推进能源结构优化。广东省建设现代化经济体系离不开能源的支撑，在无法进一步削减经济建设能源需求的情况下，优化能源结构将是减少碳排放的有效途径。广东省风能、太阳能等资源丰富，可以通过有序发展风能、太阳能、核能和生物质能等清洁能源，降低化石能源消费占比。

参考文献

- 白重恩、张琼(2017):《中国经济增长潜力预测:兼顾跨国生产率收敛与中国劳动力特征的供给侧分析》,《经济学报》第4期,第1~27页。
- 陈锡康、杨翠红等(2011):《投入产出技术》,北京:科学出版社。
- 陈占明、吴施美、马文博等(2018):《中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素分析:基于扩展的STIRPAT模型》,《中国人口·资源与环境》第10期,第45~54页。
- 陈震、刘雨豪、廖宇晗等(2018):《广东CO₂排放量影响因素分析及峰值预测》,《广东电力》第5期,第7~14页。
- 冯烽(2018):《能效改善与能源节约:助力还是阻力——基于中国20个行业能源回弹效应的分析》,《数量经济技术经济研究》第2期,第82~98页。
- 匡耀求(2015):《广东能源消费碳排放趋势与前景展望》,《南方能源建设》第1期,第1~10页。
- 林卫斌、苏剑、周晔馨(2016):《新常态下中国能源需求预测:2015~2030》,《学术研究》第3期,第106~112页。
- 马丁、陈文颖(2017):《基于中国TIMES模型的碳排放达峰路径》,《清华大学学报(自然科学版)》第10期,第1070~1075页。
- 彭水军、张文城、孙传旺(2015):《中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究》,《经济研究》第1期,第168~182页。
- 渠慎宁、郭朝先(2010):《基于STIRPAT模型的中国碳排放峰值预测研究》,《中国人口·资源与环境》第12期,第10~15页。
- 万相昱、张涛(2017):《中国的经济增长为世界经济作出了重要贡献》,《红旗文稿》第13期,第20~22页。
- 王东、吴长兰(2015):《广东碳排放现状及预测研究》,《开放导报》第6期,第91~94页。
- 吴开尧、朱启贵、刘慧媛(2014):《中国经济产业价值型能源强度演变分析——基于混合型能源投入产出可比价序列列表》,《上海交通大学学报(哲学社会科学版)》第5期,第81~92页。
- 张莹(2017):《气候变化问题经济分析方法的研究进展和发展方向》,《城市与环境研究》第

2期,第82~102页。

周平、王黎明(2011):《中国居民最终需求的碳排放测算》,《统计研究》第7期,第71~78页。

Ardent, F., M. Beccali and M. Cellura (2009), "Application of the IO Methodology to the Energy and Environmental Analysis of a Regional Context", in Suh, S. (ed.), *Handbook of Input-Output Analysis Economics in Industrial Ecology*, Dordrecht: Springer Press.

Auffhammer, M. and R. T. Carson (2008), "Forecasting the Path of China's CO₂ Emissions Using Province-level Information", *Journal of Environmental Economics & Management*, 55 (3), pp. 229 - 247.

Bullard, C. W. and R. A. Herendeen (1975), "The Energy Costs of Goods and Services", *Energy Policy*, 3 (4), pp. 268 - 278.

Casler, S. and S. Wilbur (1984), "Energy Input-output Analysis: A Simple Guide", *Resources and Energy*, 6 (2), pp. 187 - 201.

Cheng, B., H. Dai and P. Wang, et al. (2016), "Impacts of Low-carbon Power Policy on Carbon Mitigation in Guangdong Province, China", *Energy Policy*, 88, pp. 515 - 527.

Duan, H., J. Mo, Y. Fan, et al. (2018), "Achieving China's Energy and Climate Policy Targets in 2030 under Multiple Uncertainties", *Energy Economics*, 70, pp. 45 - 60.

Fan, Y. and Y. Xia (2012), "Exploring Energy Consumption and Demand in China", *Energy*, 40 (1), pp. 23 - 30.

Hawdon, D. and P. Pearson (1995), "Input-output Simulations of Energy, Environment, Economy Interactions in the UK", *Energy Economics*, 17 (1), pp. 73 - 86.

IPCC (2006), *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Geneva, Switzerland.

IPCC (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.

Jiang, K. and X. Hu (2006), "Energy Demand and Emissions in 2030 in China: Scenarios and Policy Options", *Environmental Economics & Policy Studies*, 7 (3), pp. 233 - 250.

Liu, J., W. Chen and D. Liu (2011), "Scenario Analysis of China's Future Energy Demand Based on TIMES Model System", *Energy Procedia*, 5, pp. 1803 - 1808.

Miller, R. E. and P. D. Blair (2009), *Input-output Analysis: Foundations and Extensions (second ed.)*, Cambridge: Cambridge University Press.

Proops, J. L. R. (1977), "Input-output Analysis and Energy Intensities: A Comparison of Some Methodologies", *Applied Mathematical Modelling*, 1 (4), pp. 181 - 186.

Shan, B., M. Xu and F. Zhu, et al. (2012), "China's Energy Demand Scenario Analysis in 2030", *Energy Procedia*, 14, pp. 1292 - 1298.

Xu, W., R. Gu and Y. Liu, et al. (2015), "Forecasting Energy Consumption Using a New GM-ARMA Model Based on HP Filter: The Case of Guangdong Province of China", *Economic Modelling*, 45, pp. 127 - 135.

Yu, S., S. Zheng and X. Li, et al. (2018), "China Can Peak Its Energy-related Carbon Emissions before 2025: Evidence from Industry Restructuring", *Energy Economics*, 73, pp. 91 - 107.

Research on the Forecasting of Energy Demand and the Paths of Carbon Emissions Reaching Peak of Guangdong Province: Based on the Hybrid-units Energy Input-output Model

FENG Feng¹, BAI Chong-en²

(1. Institute of Quantitative and Technical Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China; 2. School of Economics and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Guangdong is a pioneer region of reform and opening-up and typical province in China. Its paths of carbon emissions peak have important reference value for investigating China to achieve carbon emissions peak in 2030. In this paper, the energy demand and carbon dioxide emissions of Guangdong Province are forecasted based on the hybrid-units energy IO model and RAS update technique by establishing the energy input-output table with energy real term flows according to the development of Guangdong Province and the energy consumption “double control” binding index. The results showed that: (1) Non-metallic mineral products industry, metal smelting and rolling processing industry, chemical industry, textile industry, paper printing and cultural and educational sporting goods manufacturing industry are the “double high” industries of direct energy consumption and complete energy consumption in Guangdong Province, while, construction industry is a high complete energy consumption industry due to use a large amount of intermediate high-energy density inputs such as steel and chemical materials. (2) With the decline of economic growth, the peak time of energy demand and carbon dioxide emissions depends to a large extent on the speed of energy efficiency improvement. The speed of energy efficiency improvement before 2030 is the most important for Guangdong Province to achieve the energy conservation and emission reduction targets as scheduled. (3) In the economic growth benchmark scenario, if the energy consumption per unit of GDP drops by 3% per year, the carbon peak can be achieved in 2028, with a peak of about 62.732 million tons of carbon dioxide. If the energy consumption per unit of GDP drops by 4% annually, energy demand and carbon emissions will peak in 2027 and 2022, respectively. A relatively mild abatement path is the energy consumption per unit of GDP decrease by 17% during the “13th Five-Year Plan”, “14th Five-Year Plan” and “15th Five-Year Plan” periods respectively, and by 16%, 15% during the “16th Five-Year Plan”, during the “17th Five-Year Plan” respectively, so that the energy demand will peak at 36.806 million tce in 2028 and carbon dioxide emissions will peak at 58.991 million tons of carbon dioxide in 2025.

Key Words: energy demand forecasting; carbon emissions path; hybrid-units; energy input-output model

责任编辑：周枕戈