

基于计量经济学的能源转型背景下全球碳排放预测分析方法

李晨¹, 耿亮², 熊焱¹, 石访^{1*}, 张恒旭¹

(1. 山东大学全球能源互联网战略技术研究院, 山东省 济南市 250061;

2. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031)

Forecasting and Analyzing Global Carbon Emissions Based on Econometrics Against the Background of Energy Transformation

LI Chen¹, GENG Liang², XIONG Yi¹, SHI Fang^{1*}, ZHANG Hengxu¹

(1. Global Energy Internet Strategic Technology Research Institute of Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China;

2. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China)

Abstract: The construction of the Global Energy Interconnection (GEI) helps to promote the consumption of renewable energies instead of fossil energy. Based on an environmental impact evaluation model which is called STIRPAT (stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology) and a vector auto regression (VAR) model, a method is proposed in this paper to assess the impact of the construction process of the GEI on global carbon emissions. Firstly, several driving factors closely related to global carbon emission are analyzed and ranked using the Kaya equation and the grey relational analysis method. On this basis, an extended STIRPAT model considering carbon emissions per unit of energy consumption is built to predict the global carbon emissions in the process of energy transformation. In addition, the vector auto regression method is adopted to clarify the interactions between the driving factors. Finally, the predictions of global carbon emissions in different scenarios of GEI construction are made by using the model that we build, and the results is thoroughly analyzed.

Keywords: Global Energy Interconnection; STIRPAT model; carbon emission; vector auto regression model; Kaya equation

摘要: 建设全球能源互联网 (Global Energy Interconnection, GEI), 有助于推动能源体系由化石能源向低碳可再生能源转型。为确定GEI战略的实施对全球碳排放的影响, 文章以计量经济学理论为基础, 提出STIRPAT (stochastic impacts by regression on population, affluence and technology) 模型和向量

自回归 (vector auto regressive, VAR) 模型相结合的一种全球碳排放预测方法。研究首先利用Kaya等式和灰色关联分析方法, 对与全球碳排放密切关联的驱动因素进行分析并排序; 在此基础上, 建立了考虑单位能耗碳排放量的拓展STIRPAT模型, 实现对能源转型过程中全球碳排放进程的预测, 并利用向量自回归方法明确各驱动因素之间的相互作用关系; 最后, 针对3种GEI建设情景, 利用上述模型预测全球碳排放进程, 并对结果进行分析。

关键词: 全球能源互联网; STIRPAT模型; 碳排放; VAR模型; Kaya等式

0 引言

能源转型是当今人类社会发展的必然趋势, 加快推进能源生产和消费由以化石能源为主向清洁低碳化发展^[1-3], 符合人类共同利益。中国所倡导的全球能源互联网建设, 为推动世界能源转型、应对气候变化提供了切实可行的新思路。减少碳排放、控制全球升温, 是能源转型的重要目标和推动力。准确预测全球碳排放进程和发展趋势, 对于合理制定全球能源互联网建设规划等能源转型战略举措具有重要作用。

目前各国关于全球碳排放预测的方法可以分为两大类。第一类方法从资源禀赋、各类能源生产消费需求等方面进行详细的全过程建模。文献[4]建立了区域能源互联网的系统动力学模型, 可对区域能源互联网的综合效益进行量化评估。文献[5]采用系统动力学模型对北京市的能源消耗和二氧化碳排放趋势进行预

基金项目: 全球能源互联网集团有限公司科技项目 (全球能源互联对能源转型和能源中心转移影响及应对战略研究, GEIGC-S-[2018]068)。

测。此类方法虽充分考虑变量影响,但模型较为庞大、计算复杂,各变量间的相互影响关系需预先设置,模型的优劣取决于先验条件是否准确,部分方法的预测结果相比于实际数据误差较大,实用性仍有待提高。

第二类方法采用计量经济学原理^[6],选取关键变量,在宏观上对能源系统与影响因素之间的定量关系进行分析预测。文献[7]评估了环境负荷方程(human impact of population, affluence and technology, IPAT)和STIRPAT(stochastic impacts by regression on population, affluence and technology)模型,表明后者可得出更加精确的分析结果。文献[8]在STIRPAT模型基础上引入环保法规要素,表明人口和经济是碳排放增加的重要因素。文献[9]使用线性面板计量法,研究并确认了经济发展、能源转型与碳排放的长期均衡关系。此类方法通过筛选关键影响变量,大大降低了模型的复杂程度,显著减少了计算量,预测分析的误差较小,但无法考虑各变量间的相互关系,所采用模型的可解释性较差。

因此,现有方法尽管可给出全球碳排放的预测结果,并总结出人口经济对碳排放总量影响更大、能耗强度比能源结构的影响程度更大等宏观结论^[10],但不能解释内部各变量之间的相互作用关系。基于计量经济学的预测研究,均假设解释变量之间互不影响,但在实际的系统发展过程中,各变量之间存在相互作用关系(包括时间滞后性及作用程度)。基于系统动力学模型的方法,需要预先设定方可考虑各要素间的作用关系,模型的可解释性和自适应性较差。全球能源互联网的建设,将电力流、信息流和资金流等更紧密的融入全球能源系统,影响全球碳排放的关键要素及各要素间的作用关系,将随着能源转型进程而不断调整;另一方面,准确预测全球碳排放的进程,对于全球能源互联网建设规划具有重要指导作用。

能源转型背景下全球碳排放预测和关键影响要素间的作用关系分析亟需深入研究。本文提出一种拓展的STIRPAT模型,在历史数据分析基础上,将单位能耗碳排放量作为新增变量引入传统模型,通过了计量经济学常用的模型检验,并利用近30年的实测数据确定模型参数,应用早期历史数据对模型的精确性进行了检验;进而用向量自回归(vector auto regressive, VAR)模型,对各要素间的相关性进行分析;最后,利用上述模型对全球能源互联网不同建设情景下的未来30年全球碳排放进程进行预测,分别对影响全球碳排放的关键要素进行分析。

1 影响碳排放的关键因素分析

能源转型的重要结果之一是碳排放的变化,确定影响碳排放的关键要素是建立预测模型的基础。综合Kaya恒等式变量和灰色关联分析法,对影响碳排放的关键因素进行关联度分析。

Kaya恒等式建立起了经济、政策和人口等因素与人类活动之间的联系,可对低碳经济的内涵进行分解^[11],公式如下:

$$\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2}{\text{PEC}} \cdot \frac{\text{PEC}}{\text{GDP}} \cdot \frac{\text{GDP}}{\text{TDP}} \cdot \text{TDP} \quad (1)$$

式中:CO₂代表二氧化碳排放量;PEC代表一次能源消耗总量;GDP代表该国国内生产总值;TDP代表该地区的国内人口总量。第一项分式代表单位能耗碳排放强度,第二项分式代表单位GDP能耗,第三项分式代表人均生产总值。

根据Kaya等式可以得出,碳排放是能源消耗、经济发展和人口规模共同作用的结果。利用灰色关联分析法,可进一步分析各变量的发展趋势或相似程度。以碳排放量作为参考数列,选取世界总人口、人均GDP、单位能耗碳排放强度和单位GDP能耗作为比较数列。用X_i表示上述5种变量,下标i表示变量的类型。其中,X₀表示碳排放量,其余比较数列用X₁~X₄来表示。设n为比较数列(即被评价对象)的个数,此处n=4;每个比较数列数据个数为m,从而形成n×m阶数据矩阵X_i∈R_{n×m}。

各变量的物理意义不同、量纲不一致,为便于比较,对选择的比较数列和参考数列进行无量纲化处理。此处选用均值化法,得到归一化后的矩阵N∈R_{n×m}:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (2)$$

式中:变量类型i=0,1,⋯,n;时间节点j=1,2,⋯,m。

由N计算灰色关联系数矩阵C∈R_{n×m}:

$$c_{ij} = \frac{\min_{i=1}^n \min_{j=1}^m |x_{0j} - x_{ij}| + \rho \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m |x_{0j} - x_{ij}|}{|x_{0j} - x_{ij}| + \rho \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m |x_{0j} - x_{ij}|} \quad (3)$$

式中:c_{ij}为关联系数矩阵中C的元素,表示碳排放总量与变量数据i在第j年的关联程度,其取值范围为[0,1],数值越大表明关联程度越高;ρ为分辨系数,通常取0.5。

最后,由矩阵C按照下式计算关联度向量R:

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m c_{ij} \tag{4}$$

式中： r_i 为 R 中元素，表示碳排放总量与数据变量 i 的灰色关联度，取值范围为 $[0,1]$ ，其数值越大表明两时间序列轨迹的匹配程度越高。

使用1990—2017年的年度数据对以上5个变量序列进行分析。其中，碳排放总量、一次能源消费量的数据均来自于英国石油公司（British Petroleum，BP）能源数据统计；世界GDP、世界人口总量和世界人均GDP数据均选自世界银行数据库。相关GDP数据已折合成2010年不变价美元。单位能耗的碳排放强度、单位GDP能耗由上述数据推算所得。变量信息如表1所示。

表 1 研究的变量信息			
Table 1 Variable information in research			
变量类型	符号	因素	单位
被解释变量	I	世界碳排放量	百万二氧化碳
	P	单位能耗碳排放	百万二氧化碳/百万t油当量
解释变量	A	单位GDP能耗	百万t石油当量/万亿美元
	G	世界人口	亿人
	T	人均GDP	美元

按照上述步骤可以得到各个因素相对于参考序列的关联度如表2所示。从中可以得到如下结论：全球碳排放受人均GDP影响最大，二者有较强的关联性；其余因素与全球碳排放总量关联强弱顺序依次是：世界总人口、单位能耗碳排放和单位GDP能耗。表明需要针对上述4类要素，分别选取相应的量化指标，建立碳排放分析模型。

表 2 比较序列和参考序列之间的关联度				
Table 2 The correlation degree between the comparison sequence and the reference sequence				
	A	P	G	T
关联度	0.56	0.60	0.75	0.83

2 碳排放预测分析模型的建立

2.1 拓展的STIRPAT模型

STIRPAT模型可定量分析全球碳排放的变化进程，将多种因素的作用转换为非线性的随机模型，克服了IPAT模型局限性，可以对各种非线性效应进行分

解^[7]，提供更精确的分析结果。进一步考虑前述影响碳排放的关键因素，提出拓展的STIRPAT模型，公式如下：

$$I = \alpha P^b A^c T^d G^e \varepsilon \tag{5}$$

式中： I 、 P 、 A 、 T 、 G 的含义如表1所示； α 为模型系数； ε 为模型的误差项，反映了未纳入模型中的其他因素的影响。

为便于分析，将指数形式转化为对数形式，符合线性特征，公式如下：

$$\ln I = \ln \alpha + b \ln P + c \ln A + d \ln T + e \ln G + \ln \varepsilon \tag{6}$$

式中： b 、 c 、 d 、 e 为各变量的弹性系数，表示自变量对因变量的影响程度，即 P 、 A 、 T 、 G 各自变化1%时，因变量 I 将相应地变化 $b\%$ 、 $c\%$ 、 $d\%$ 和 $e\%$ 。

2.2 单位根检验与协整分析

采用时间序列进行计量经济学建模，需要保证各时间序列为平稳序列，否则可能会出现“伪回归”现象。首先需要对所选用时间序列进行单位根检验^[12]。利用EViews 8.0软件的检测结果如表3所示。

表 3 单位根检验结果				
Table 3 Results of unit root test				
变量	检验类型	ADF	P	结论
$\ln I$	(c,t,1)	-1.938 298	0.6061	不平稳
$\Delta \ln I$	(c,t,0)	-3.335 401	0.0235	平稳
$\ln P$	(c,t,1)	-1.067 768	0.2505	不平稳
$\Delta \ln P$	(c,t,0)	-2.717 687	0.0086	平稳
$\ln A$	(c,t,1)	-2.495 415	0.3274	不平稳
$\Delta \ln A$	(c,t,0)	-1.617 062	0.0985	平稳
$\ln T$	(c,t,0)	-3.070 962	0.1330	不平稳
$\Delta \ln T$	(c,t,0)	-4.304 276	0.0112	平稳
$\ln G$	(0,t,1)	-1.143 739	0.6825	不平稳
$\Delta \ln G$	(0,t,0)	-4.434 460	0.0018	平稳

经检验发现前述5个变量均为非平稳序列，进行一阶差分后再次检验发现序列平稳，即5个时间序列均为一阶单整序列。

由于不平稳的时间序列变量无法进行计量回归估计，可将不平稳的序列先消除变量的趋势或者进行变量差分，把不平稳的时间序列数据转换为平稳序列。但是，当几个不平稳时间变量的线性组合是平稳变量时，称这几个非平稳时间变量存在协整关系，表明变量间存在长期均衡关系，可以在系统偏离均衡点时将

系统拉回均衡状态, 仍可进行回归分析。基于EViews软件中Johansen协整检验功能进行具体的协整关系检验, 结果如表4所示。

表4 协整分析检验结果

Table 4 Results of cointegration analysis test

检验假设	Trace统计量	5%临界值	P
None	96.505 82	69.818 89	0.0001
At most 1	60.929 12	47.856 13	0.0019
At most 2	31.451 33	29.797 07	0.0320
At most 3	9.207 845	15.494 71	0.3465
At most 4	0.284 848	3.841 466	0.5935

根据检验结果, 在5%置信水平下, 5个变量之间至少存在一个协整关系, 所以即使在序列不平稳情况下, 仍然可以进行回归分析。

2.3 模型参数的确定

根据式(6)所示的多元回归模型, 利用已有数据采用最小二乘法对模型参数进行估计, 得到表达式如下:

$$\ln I = 1.029 \ln P + 0.982 \ln A + 1.005 \ln G + 0.981 \ln T - 8.987 \quad (7)$$

该回归方程的参数见表5。结果显示调整系数R2高度接近1, 表明该回归方程拟合程度较好, 可解释99%以上的被解释变量的变化, 各系数显著性良好。用于检验残差是否存在自相关的DW值为1.35, 存在自相关风险, 需进一步检验。分别采用拉格朗日数乘(Lagrange multiplier, LM)检验分析残差序列是否存在自相关性, 用White检验来分析是否存在异方差性。检验过程均在EViews中完成, 其检验结果见表6。统计结果显示, 方程无自相关性且无异方差干扰。该回归方程拟合良好, 可以表示5个变量之间的长期均衡关系。

表5 世界能源碳排放预测模型方程参数

Table 5 Equation parameters of the world energy carbon emission forecast model

参数	最大残差	T-Prob
$\ln P$	1.029	0.009
$\ln A$	0.982	0.006
$\ln G$	1.005	0.078
$\ln T$	0.981	0.305

续表

参数	最大残差	T-Prob
C	-8.986	0.041
Adjusted-R2	1.000 (0.999 997)	—
DW	1.348	—

表6 自相关性和异方差性检验结果

Table 6 Autocorrelation and heteroscedasticity test results

LM统计量	2.725	概率	0.099
White统计量	4.393	概率	0.356

式(7)表明, 当以二氧化碳排放量为表征能源转型的特征量时, 影响最大的变量为单位能耗碳排放强度, 当其强度每增长1%时, 对应二氧化碳排放量将增长1.029%。

2.4 历史数据验证

选取1990—2017年的数据建立模型, 为说明模型的有效性, 选取更早时间节点(1965—1990年)的历史数据进行验证, 并与传统线性IPAT模型进行对比, 结果如表7所示。可以看出, IPAT模型对短期内数据进行预测才能收到较好的效果, 对于相距输入时间较远的时间, 预测数据误差很大。

表7 STIRPAT模型检验及模型对比

Table 7 STIRPAT model test and model comparison

年份	IPAT模型碳排放量/百万t	误差/%	拓展STIRPAT模型碳排放量/百万t	误差/%
1965	15 344	37.13	11 278	0.79
1970	17 803	24.78	14 326	0.41
1975	18 721	15.23	16 288	0.25
1980	19 826	7.96	18 383	0.10
1985	19 830	3.31	19 208	0.06
1990	21 380	0.40	21 288	-0.03

拓展STIRPAT模型不仅可以很好地预测短期的数据, 而且对远期数据的预测结果同样较好, 整体误差都在1%以下, 所有误差均小于同期线性回归的误差。

2.5 基于VAR模型的变量间作用关系分析

STIRPAT模型只能描述解释变量和被解释变量之间的关系, 使用VAR模型进一步分析说明解释变量之间的关系。

VAR模型需基于平稳的时间序列构建,对上述扩展STIRPAT模型的5个不平稳时间序列变量(见表3)进行一阶差分,获得平稳时间序列,即 $\Delta \ln I_t$ 、 $\Delta \ln P_t$ 、 $\Delta \ln A_t$ 、 $\Delta \ln G_t$ 和 $\Delta \ln T_t$ 5个样本序列,构建VAR模型。通过对模型的所有滞后阶数进行建模,根据赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)和施瓦兹准则(Schwarz criterion, SC)^[12],选取了滞后阶数为1的最优模型进行分析,计算过程在EViews中完成,拟合结果如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta \ln I_t \\ \Delta \ln P_t \\ \Delta \ln A_t \\ \Delta \ln G_t \\ \Delta \ln T_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8.259 & 8.995 & 9.261 & 8.509 & 8.301 \\ 0.016 & 0.131 & 0.342 & 0.592 & 0.115 \\ 0.646 & -0.230 & -0.303 & -2.022 & -0.913 \\ 0.090 & -0.071 & -0.096 & 0.800 & -0.093 \\ -9.147 & 9.309 & 9.440 & 9.202 & 9.329 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ln I_{t-1} \\ \Delta \ln P_{t-1} \\ \Delta \ln A_{t-1} \\ \Delta \ln G_{t-1} \\ \Delta \ln T_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.023 \\ -0.009 \\ 0.017 \\ 0.001 \\ 0.014 \end{bmatrix} \quad (8)$$

上述VAR模型根的分布情况如图1所示,根的个数为内生变量个数与最大滞后阶数的乘积。在滞后阶数为1时,5个内生变量对应的5个特征根模倒数均在单位圆内,表明该模型是稳定的,可以应用脉冲响应函数和方差分解进行各变量之间的作用关系分析。

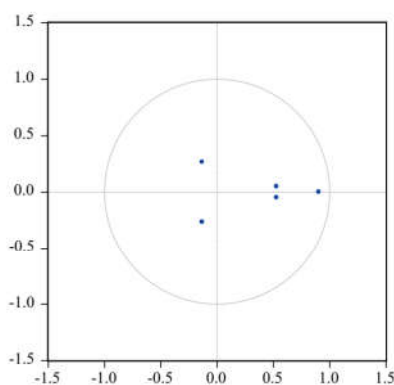


图1 VAR模型单位根检验结果

Fig. 1 Unit root test results of VAR model

3 全球碳排放预测

3.1 预测情景介绍

针对4个场景进行全球碳排放预测,分别为原始情景以及全球能源互联网建设背景下的低速发展情景、中速发展情景和高速发展情景。

原始情景以《BP世界能源展望2019版》为依据,假定国际能源、经济形势以现在观测到的速率发展,按照现有的能源投融资模式、能源政策等。另外3种情景则根据《全球能源互联网骨干网架研究2018版》所提出的高、中、低3个发展情景,分别估算出清洁

能源在一次能源结构中的占比,进而改变单位能源消耗的碳排放强度。最终预测不同情境下的全球二氧化碳排放量^[13-14]。至2050年,3种全球能源互联网建设情景下的数据如表8所示。

表8 3种全球能源互联网情景设置^[15]

Table 8 Three scenarios of Global Energy Interconnection^[15]

项目	低情景	中情景	高情景
GDP年均增速	3.04%	3.24%	3.40%
人口/亿	87.5	97.7	108.5
清洁能源占比	65.0%	71.6%	75.2%
一次能源总量/亿吨标煤	238	260	276

3.2 碳排放预测结果

首先在原始情形下,基于历史数据对2018—2050年的二氧化碳排放量进行外推预测(结果如图2所示),可见2018年后二氧化碳排放量保持增长趋势,到2040年左右出现拐点,这与许多研究结果中提到的二氧化碳库兹涅茨曲线相似,即按照目前国际能源生产利用水平,到2040年二氧化碳排放量将达到峰值,并逐渐下降,但总量将超过地球环境的承载极限。

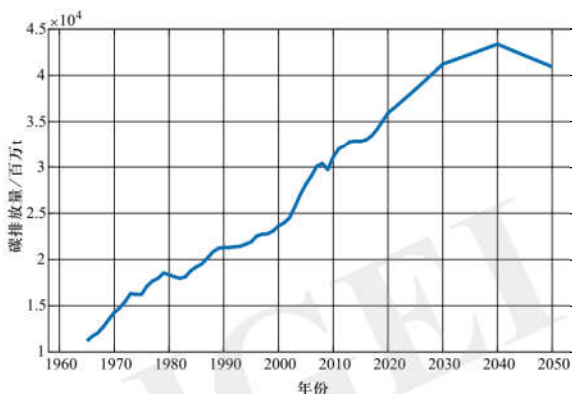


图2 1965—2050年世界原始情景下二氧化碳排放图

Fig. 2 Carbon dioxide emission in the original world scenario from 1965 to 2050

上述模型和方法同样适用于地区和国家碳排放预测分析,对不同区域的研究依据实际情况选取不同变量建立模型。可得到未来中国碳排放量预测结果如图3所示。中国碳排放今后近10年将缓慢上升,并于2030年左右达到峰值,排放量在2030至2050年间持续下降。利用VAR模型方差分解分析表明,中国目前发电结构中化石能源占比仍过高。

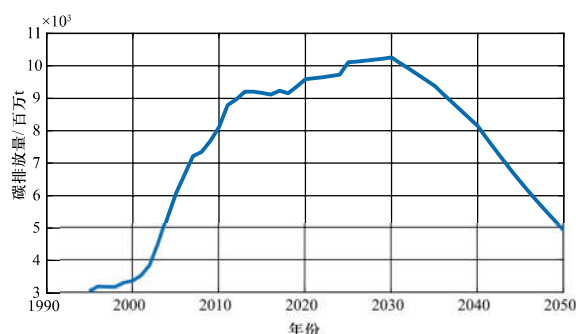


图3 1995—2050年中国原始情景下二氧化碳排放图

Fig. 3 Carbon dioxide emission in China's original scenario from 1995 to 2050

3.3 全球能源互联网建设情景下的全球碳排放预测

构建全球能源互联网, 加强国际能源合作, 是实现能源高效利用、推进能源转型的重要战略手段。为实现全球范围内能源的优化配置, 全球能源互联网发展合作组织规划建设“九横九纵”洲际互联网, 广泛连接大规模能源生产基地和负荷需求中心^[13]。全球能源互联网的建设, 会对世界能源经济发展产生重要影响。

按照表8中的数据, 重新计算模型参数, 对全球能源互联网高、中、低3种建设情景下的全球碳排放进行预测, 结果见图4。全球能源互联网建设对碳减排的效果显著, 在3种情景下, 全球碳排放峰值都会提前到来, 即2030年前后, 碳排放将达到历史最高值, 化石能源消耗总量达到最大。

为达到《巴黎协定》中本世纪温升控制在 2°C 以下的目标, 联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)对碳排放控制目标测算报告显示: 2030年, 全球二氧

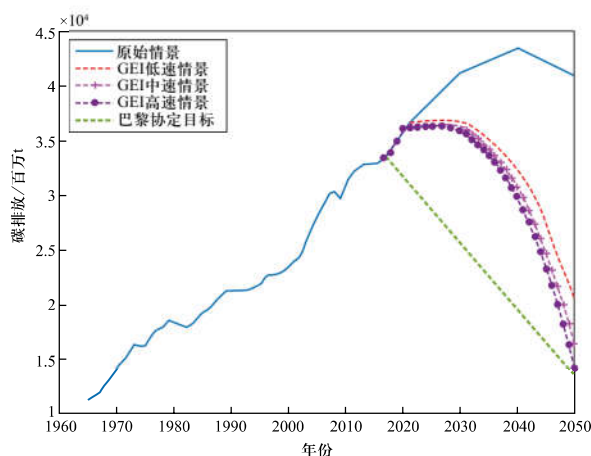


图4 不同情景下全球二氧化碳排放图

Fig. 4 Global carbon dioxide emission in different scenarios

化碳排放量应下降至80%, 并在2075年左右达到零净值^[16]。这与国际能源署(International Energy Agency, IEA)^[17]和英国石油公司(BP)^[18]在低碳发展战略下的全球碳排放预测趋势基本一致。

GEI大力推动清洁能源的开发利用将对二氧化碳减排提供巨大的助力。GEI高速情景下, 到2035年, 全球碳排放将减少至目前的75%左右; 到2050年, 二氧化碳排放量将降至每年150亿t左右, 减碳效益显著; 到2075年, 可以满足零碳排放的目标。分析结果表明, 全球能源互联网的建设有助于推动能源转型, 促成实现《巴黎协定》相关碳减排的目标。

3.4 影响碳排放的各要素间关系分析

分析影响全球碳排放的各要素间的相互作用关系, 对于评估预测模型的合理性和制定相应的能源策略具有重要意义。脉冲响应可以解释冲击对某个变量在不同时间的影响结果, 反映的是某一变量对另一变量的动态影响路径。方差分解提供了关于每个扰动项影响各个变量的相对程度^[12]。图5和图6分别给出了考虑式(6)中5个样本序列的VAR模型脉冲图和方差分解图。

图5给出4个解释变量对于冲击的响应情况。图中的横坐标代表对响应函数追踪期限, 以年为单位; 纵轴代表变量的响应程度, 图中的曲线为响应函数的计算值^[19]。图5(a)表明, 当碳排放受到一个正向脉冲冲击时, 单位能耗碳排放强度在前两期保持稳定, 第三期迅速下降, 之后趋于平稳。单位GDP能耗受到冲击时, 初始对单位能耗碳排放强度的影响不显著, 但在第三期到达顶峰, 作用效果随着时间缓慢下降。在图5(c)中, 碳排放冲击对于人均GDP有很强的正响应, 随后逐渐衰减至零, 没有负响应。这可以解释为, 大量消耗化石能源造成碳排放突增的行为, 会在短期内使人均GDP大幅度提升, 但不能持久地维持经济增长。可以根据另外三张脉冲响应图, 可分别得到单位GDP能耗、人均GDP和人口受到不同变量冲击后各自的动态响应过程。

图6给出了4个解释变量受到其他变量冲击的影响程度。图6(a)的方差分解图表明, 对于单位能耗碳排放强度来说, 碳排放量、单位GDP能耗的贡献度最显著, 初始前3期贡献变化明显, 随后贡献度平稳。当单位能耗碳排放强度受到冲击后, 其余变量对于该影响的累计解释程度达到60%以上。图6(d)表明, 当世界人口总量受到冲击时, 稳定后其余变量对该影响的累计解释程度仅有20%, 说明人口受模型要素以外的其他因素影响。

全球能源互联网的建设首先带来的是一次能源消费的变化, 在模型中将表现为 $\Delta \ln P$ 的变化。在脉冲

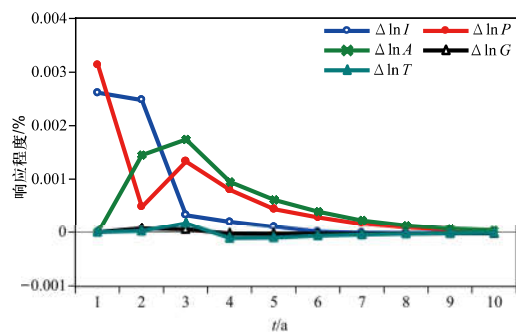
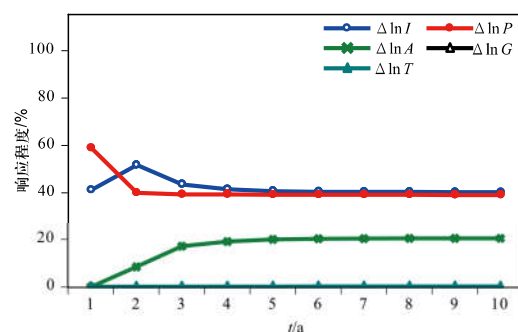
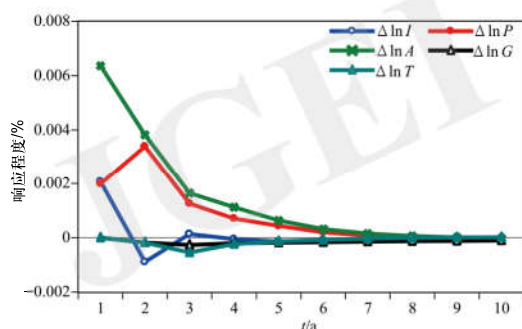
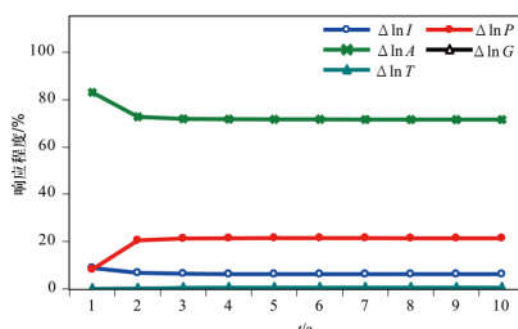
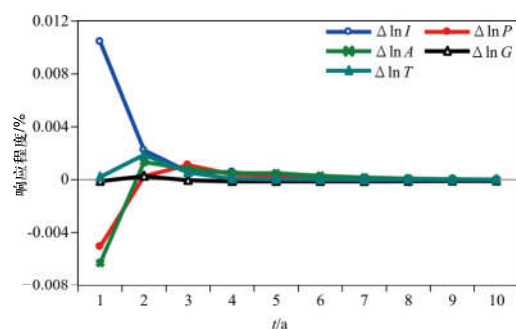
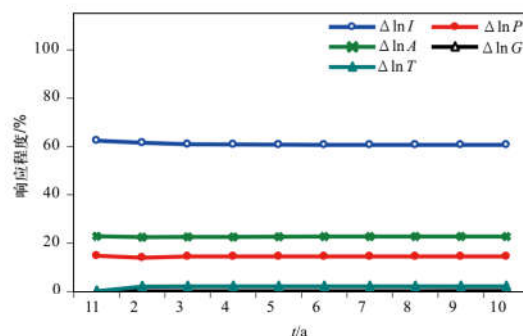
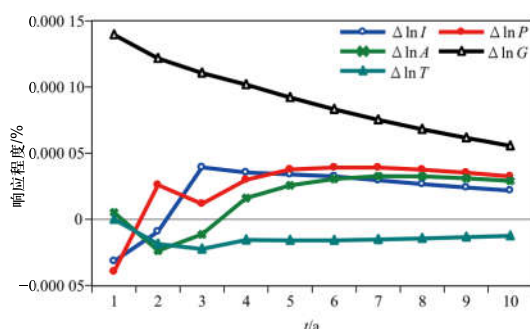
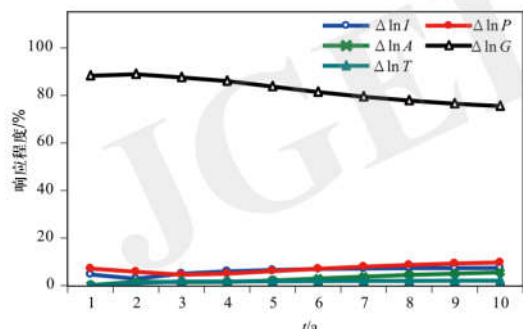
(a) 变量 $\Delta \ln P$ 对模型变量的响应(a) 变量 $\Delta \ln P$ 的方差分解结果(b) 变量 $\Delta \ln A$ 对模型变量的响应(b) 变量 $\Delta \ln A$ 的方差分解结果(c) 变量 $\Delta \ln T$ 对模型变量的响应(c) 变量 $\Delta \ln T$ 的方差分解结果(d) 变量 $\Delta \ln G$ 对模型变量的响应(d) 变量 $\Delta \ln G$ 的方差分解结果

图5 VAR模型脉冲响应图

Fig. 5 Impulse response of VAR model

图6 VAR模型方差分解图

Fig. 6 Variance decomposition of VAR model

响应分析[图5(b)]中可以发现, 当 $\Delta \ln P$ 受到正向冲击时, 对单位GDP能耗具有正向影响, 随后该影响逐渐衰减, 在第7期之后作用消失, 整个过程不会出现负

响应。表明全球能源互联网有助于降低单位能耗碳排放, 同时会促使单位GDP能耗指标降低, 也可理解为促进技术手段的提高。

4 总结

本文以计量经济学为理论基础,提出一种拓展的STIRPAT模型,并结合VAR模型,进行未来全球碳排放预测和各影响要素间相互作用分析。单位根检验和协整检验表明模型稳定,利用历史数据进行校验,模型预测误差在1%以内。根据脉冲响应和方差分解,进一步分析了影响碳排放各要素之间的动态作用关系。针对原始情景和全球能源互联网3种建设情景下的全球碳排放进程进行了预测,结论如下。

1) 相比于原始情景,全球能源互联网高速情景下世界碳排放峰值显著降低并将提前10年左右到来,可实现《巴黎协定》中至2075年碳排放零净值的目标。

2) 全球能源互联网的建设推动一次能源消费变革,在脉冲响应分析中可以发现,该影响会对二氧化碳排放量造成反向作用,表明全球能源互联网的建设会加快去碳化的进程。

参考文献

- [1] 赵宏图. 国际能源转型现状与前景[J]. 现代国际关系, 2009, (6): 35-42.
- [2] 金乐琴. 德国能源转型战略及启示[J]. 调研世界, 2014, (11): 61-64.
- [3] BREYER C, BOGDANOV D, KOMOTO K, et al. North-east Asian super grid: renewable energy mix and economics[C]// Proceedings of the 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Kyoto: WCPEC, 2014: 1-40.
- [4] 江涵, 高艺, 李隽, 等. 基于系统动力学的区域能源互联网综合效益分析[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 16-26.
- [5] JIANG Han, GAO Yi, LI Jun, et al. The comprehensive benefit analysis of regional energy interconnection based on system dynamics method[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 16-26(in Chinese).
- [6] FENG Y Y, CHEN S Q, ZHANG L X. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China[J]. Ecological Modelling, 2013, 252: 44-52.
- [7] 钟兴菊, 龙少波. 环境影响的IPAT模型再认识[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(3): 61-68.
- [8] ZHONG Xingju, LONG Shaobo. Rethinking the environmental impact of the IPAT model[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(3): 61-68(in Chinese).
- [9] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.
- [10] HASHMI R, ALAM K. Dynamic relationship among environmental regulation, innovation, CO₂ emissions, population, and economic growth in OECD countries: A panel investigation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 1100-1109.
- [11] 谢志明, 晏奎, 周乐明, 等. 经济增长、能源转型与CO₂排放的长期均衡: 基于省级面板数据的实证分析[J]. 财经理论与实践, 2017, 38(6): 113-118.
- [12] XIE Zhiming, YAN Kui, ZHOU Leming, et al. Research of long-run equilibrium between economic growth/energy transformation and CO₂ emissions: an empirical study based on provincial panel data analysis[J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2017, 38(6): 113-118(in Chinese).
- [13] 韩媛媛, 廖剑宇, 张旺, 等. 长沙市规模以上工业能耗碳排放测算与预测研究[J]. 国土与自然资源研究, 2017, (5): 46-50.
- [14] HAN Yuanyuan, LIAO Jianyu, ZHANG Wang, et al. Calculation and prediction of carbon emission from industrial scale energy consumption in Changsha[J]. Territory & Natural Resources Study, 2017(5): 46-50(in Chinese).
- [15] 秦军, 唐慕尧. 基于Kaya恒等式的江苏省碳排放影响因素研究[J]. 生态经济, 2014, 30(11): 53-56.
- [16] QIN Jun, TANG Muyao. Research of the carbon emission factor of Jiangsu Province based on Kaya identity[J]. Ecological Economy, 2014, 30(11): 53-56(in Chinese).
- [17] 马慧慧. EViews统计分析与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [18] 李隽, 宋福龙, 余潇潇. 全球能源互联网骨干网架规划研究[J]. 全球能源互联网, 2018(5): 527-536.
- [19] LI Jun, SONG Fulong, YU Xiaoxiao. Research on global energy interconnection backbone grid planning[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018(5): 527-536(in Chinese).
- [20] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110, 5391.
- [21] LIU Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110, 5391(in Chinese).
- [22] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网骨干网架规划研究[R]. 北京: GEIDCO, 2018.
- [23] 姜维. CIDEG决策参考——全球1.5℃升温目标下中国的应对决策[R]. 北京: 清华大学产业发展与环境治理研究中心. 2019.03.
- [24] IEA. World Energy Outlook 2019[R]. IEA, 2019.
- [25] BP p.l.c. BP Energy Outlook (2019 edition)[R]. United Kingdom: 2019.
- [26] 王文阳, 吕德宏. 基于VAR模型的人民币汇率与通货膨胀传导效应实证分析[J]. 商业时代, 2009(12): 74, 64.

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-12-20。



李晨

作者简介:

李晨(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: li-chen@mail.sdu.edu.cn。

耿亮(1985), 男, 高级工程师, 主要从事能源规划方面的研究工作, E-mail: liang-geng@geidco.org。

熊兢(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: xiongyi@mail.sdu.edu.cn。

石访(1982), 男, 博士, 讲师、硕士生导师, 主要研究方向为电网稳定分析与控制、PMU技术及应用。通信作者, E-mail: shifang@sdu.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)