

引用格式:吴青龙,王建明,郭丕斌. 开放STIRPAT模型的区域碳排放峰值研究——以能源生产区域山西省为例[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 1051-1062. [Wu Q L, Wang J M, Guo P B. Peak regional carbon emissions based on open STIRPAT modeling in an energy-producing region of Shanxi[J]. *Resources Science*, 2018, 40(5): 1051-1062.] DOI :10.18402/resci.2018.05.17

开放STIRPAT模型的区域碳排放峰值研究 ——以能源生产区域山西省为例

吴青龙¹, 王建明¹, 郭丕斌²

(1. 中北大学经济与管理学院, 太原 030051; 2. 太原师范学院, 太原 030619)

摘 要: 区域经济间的分工合作及相互依赖, 对区域碳排放峰值有重要影响。本文以能源生产区域山西省为例, 从山西和全国两个层面选择驱动因素构建开放STIRPAT模型, 并运用情景分析方法预测山西省2016—2040年碳排放峰值。结果显示, 全国层面选择节能或低碳情景, 可实现山西碳排放量在2035年达峰; 而同时山西以节能或低碳情景相配合, 可实现2030年之前达峰; 在当前全国碳排放控制趋于严格的背景下, 山西碳排放量2030年达峰是可以实现的; 山西碳排放峰值大小主要受全国层面情景选择影响, 受山西情景选择影响较小; 山西碳排放峰值的可控性较差, 自身减排努力对碳排放峰值时间及大小的影响相对较小; 与开放视角相比, 封闭STIRPAT模型会推迟山西碳峰值年份, 在预测时段无峰值, 并高估其排放量。因此, 山西应该从开放视角, 关注全国层面的节能发展状况, 将其作为山西碳峰值政策的重要约束因素, 制定灵活的碳排放达峰方案。

关键词: 开放STIRPAT模型; 碳排放; 峰值预测; 山西

DOI :10.18402/resci.2018.05.17

1 引言

在2014年11月中美发布的联合声明中, 中国政府首次提出在2030年前后实现碳排放达峰的战略目标。之后, 2016年2月, 国家发改委提出, “十三五”期间要探索实施碳排放总量和碳排放强度双重目标控制机制, 为实现2030年碳排放达峰奠定基础。目前, 中国已初步形成东部率先达峰, 中、西部依次跟上的梯次达峰路线图^[1], 该路线图考虑到了中国区域经济发展的差异性——东部地区正逐步进入工业化后期阶段, 而中部和西部总体上处于工业高速增长的工业化中期阶段, 与“同步低碳”思想相比有其优越性。但现有路线图忽略了区域经济在整体经济中的分工与合作, 没有认识到中国东、中、西部区域及各个省级区域经济间的相互作用与依赖——区域碳排放能否达峰会受到区域外部因

素的影响; 以此制定的区域碳排放达峰政策必然对地方经济发展不利, 并为地方政府的碳排放达峰政策的具体实施带来困扰。

目前, 就碳排放峰值的预测, 情景预测法是应用最为广泛的分析方法。宗蓓华最早对中国战略预测中的情景分析方法进行介绍^[2]。Chermach T J给出了情景分析的明确定义, 并对情景分析方法的理论发展、研究现状进行综述^[3]。由于情景分析方法将分析建立在对经济、产业及技术等所提出的各种关键假设基础之上, 能够容纳对未来情形的多种可能, 分析具有严谨、详实和全面的特点, 被广泛用于能源需求及气候变化等领域。姜克隽等利用该方法对中国中长期(2050年)的能源需求及温室气体排放进行分析^[4]。付加锋等基于情景分析方法对中国低碳经济的研究框架及问题进行了探索^[5]。王

收稿日期: 2017-06-25; 修订日期: 2018-02-07

基金项目: 教育部人文社科规划基金项目(17YJA630025); 山西省软科学研究项目(2017041030-5); 山西省哲学社会科学规划课题(晋规办字[2016]2号)。

作者简介: 吴青龙, 男, 山西翼城人, 讲师, 主要研究方向为区域经济、资源经济。E-mail: happylong102@126.com

通讯作者: 郭丕斌, E-mail: guopibin@hotmail.com

宪恩等以吉林,朱宇恩等以山西,邓小乐等以西北五省为研究对象,利用情景分析方法对各区域碳排放峰值进行预测,并提出了针对性的建议^[6-8]。

对区域碳排放峰值进行情景预测,要求明确碳排放量与驱动因素间的定量关系。就二者关系的研究,学术界采取的方法主要有IPAT模型,LEAP模型和STIRPAT模型等。其中,STIRPAT模型应用最为广泛,STIRPAT模型由IPAT模型发展而来。1971年Enrich等提出了著名的 $I=PF$ 恒等式,衡量环境影响与人口及人均环境影响之间的联系^[9];Commoner在此基础上,将人均环境影响分解为人均财富和对环境产生影响的水平,提出IPAT恒等式^[10]。随后,Dietz T等在IPAT恒等式基础上提出STIRPAT模型,STIRPAT模型脱离了IPAT模型恒等式的范畴,将区域环境的影响因素分解为人口、经济发展水平和技术因素三大类^[11]。STIRPAT模型为分析区域碳排放与驱动因素间的关系提供了一个具有较强实用性的模型架构,之后学者对该模型的发展主要在驱动因素的选取及分解方面。如Cramer把人口分解为家庭数量和人口规模^[12],陈操操等将人口分解为人口规模和城市化指标^[13];陈庆等将经济发展水平分解为人均产出和人类发展指数等^[14];更多的发展在于技术因素的分解方面,如将其分解为第二产业贡献值或二产比重^[15,16]、单位GDP能耗^[17]、全社会固定资产投资^[15]、经济区位等^[18]。但是,已有文献在分析区域碳排放量与驱动因素关系时,由于忽视了区域经济在整体经济中的分工与合作,忽略了区域经济间的相互作用与依赖,驱动因素的选择都是从封闭视角进行,认为区域环境压力只受区域内部因素驱动,与区域外部因素无关。这种封闭视角分析显然无法正确认识区域碳排放量与驱动因素的关系。

本文以能源生产区域山西省为例,将区域经济的分工合作及相互依赖纳入分析,从山西和全国两个层面选择驱动因素构建开放STIRPAT模型,运用情景分析方法预测山西省2016—2040年碳排放峰值;并以此为基础,分析山西省碳排放峰值的可控性以及封闭视角对区域碳排放峰值政策制定及执行的不利影响,为更科学地制定区域碳排放峰值政策提供理论支撑。

2 研究区概况、研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

山西是中国重要的能源生产基地,在保证全国能源供给稳定和推动全国经济发展中起到了举足轻重的作用。图1给出山西1995—2015年主要能源出省占比,可以看出,山西能源产量的很大比重被输送出省。1995—2015年,山西全部能源产量的出省占比经历先升后降过程,在2001年达最高峰,约有92%的能源产量被输送出省,之后虽逐年下降,但2015年出省占比仍达到64%。就具体能源品种,煤炭出省占比与能源出省占比趋势相同,呈先升后降态势,2015年约有57%的煤炭被输送出省;焦炭出省占比与电力出省占比逐年增加,2015年约有74%的焦炭和32%的电力被输送出省。这种原煤出省占比的逐渐下降和焦炭、电力出省占比的逐渐增加,反映了山西这些年在延长能源产业链和经济转型方面的努力^[19],也导致了山西省碳排放量在近些年的快速上升。据研究,山西省2000—2011年碳排放量年均增长率为22.32%,远高于同期经济增长率^[20]。

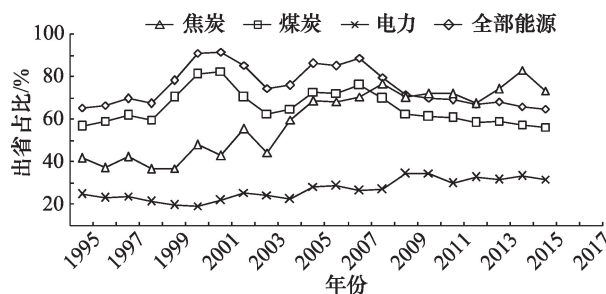


图1 1995—2015年山西主要能源出省占比

Figure 1 The proportion of Shanxi major energy sales to other provinces from 1995 to 2015

2.2 开放STIRPAT模型

传统的STIRPAT模型由IPAT模型发展而来,公式表示如下:

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times e \quad (1)$$

式中 I 、 P 、 A 和 T 分别表示区域的碳排放量、人口、经济发展水平和技术因素; a 为模型系数; b 、 c 、 d 分别为变量 P 、 A 、 T 的指数; e 为模型误差项。

正如图1所示,山西作为重要的能源生产区域,其碳排放量必然受全国经济发展所带来的能源需求的影响。鉴于此,以传统的STIRPAT模型为基

2018年5月

础,选择山西碳排放量作为环境压力指标,从山西和全国两个层面选择影响因素,构建开放 STIRPAT 模型。公式表示如下:

$$I = a \times P_i^{b_i} \times A_i^{c_i} \times T_i^{d_i} \times e \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

式中 I 为山西碳排放量; P_i 、 A_i 和 T_i 为驱动因子; b_i 、 c_i 和 d_i 为驱动因子指数; 下标 $i=1$ 或 2 分别表示影响碳排放量的山西及全国层面的驱动因子和变量指数。

对开放 STIRPAT 模型驱动因子选择,借鉴已有文献,将人口分解为人口规模和城市化率,经济发展水平分解为人均产出和二产比重,技术因素分解为万元 GDP 能耗和可再生能源比重等指标衡量。

(1) 人口分解为人口规模和城市化率两项。人口规模,为与以往文献保持一致,仍用符号 P 表示,采用人口数量衡量;城市化率 U ,采用城镇人口占总人口比重衡量。以往文献中,城市化率经常作为技术因素的分解出现,但实际上城市化率是一个综合体体现城市人口密度、生活方式的人口指标^[21],城市生活方式是一种高能耗生活,资料显示,城市人均能源消费约为农村人均能源消费的 3.5~4 倍,对区域碳排放影响很大^[22]。

(2) 经济发展水平分解为人均产出和二产比重两项。其中,人均产出仍用 A 表示,采用人均 GDP 衡量。二产比重 IN ,已有文献中,一般作为技术因素的分解项^[15,16],本文作为经济发展水平的分解指标。根据产业结构演进的“配第一克拉克定理”:随着经济的发展及人均国民收入的提高,劳动力首先从第一产业向第二产业转移,当经济进一步发展和人均国民收入进一步提高时,劳动力便向第三产业转移。也就是,根据“配第一克拉克定理”,可以用产业结构演变衡量经济发展,本文选用二产比重指标衡量。

(3) 技术因素分解为万元 GDP 能耗和可再生能源比重两项。万元 GDP 能耗用 T 表示,是衡量区域环境压力技术因素的最常用指标。可再生能源比重 RE ,采用可再生能源消费占全部能源消费的比重衡量。可再生能源比重上升会降低对化石能源的依赖,有助于碳排放量的下降^[7]。

综合以上分析,对数处理后的开放 STIRPAT 模型如公式(3)所示:

$$\ln I = \ln a + b_i \ln P_i + c_i \ln A_i + d_i \ln T_i + f_i \ln U_i + g_i \ln IN_i + h_i \ln RE_i + \ln e \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

式中 P_i 、 A_i 、 T_i 、 U_i 、 IN_i 和 RE_i 分别为山西碳排放量 I 的驱动因子; b_i 、 c_i 、 d_i 、 f_i 、 g_i 和 h_i 分别为变量 $\ln P_i$ 、 $\ln A_i$ 、 $\ln T_i$ 、 $\ln U_i$ 、 $\ln IN_i$ 和 $\ln RE_i$ 的回归系数,这些回归系数反映了各驱动因子与山西碳排放量间的弹性关系,即弹性系数;下标 $i=1$ 或 2 ,分别表示模型的山西及全国层面的驱动因子和弹性系数。

2.3 情景分析设定

利用情景分析对区域碳排放峰值预测,首先要综合考虑碳排放各个影响因素或指标的基础上,对区域的未来发展给出情景设定。付加锋等分基准情景、低碳经济转型情景和低碳经济和谐发展情景对 2005—2050 年中国的低碳发展进行探讨^[5];王宪恩等分基准情景、节能情景、节能—低碳情景和低碳情景对吉林省 2010—2050 年的碳排放峰值进行预测^[6]。参考已有文献分析,本文设定 3 种情景,即基准情景、节能情景和低碳情景,对山西碳排放峰值进行预测,时间跨度为 2016—2040 年。

2.3.1 基准情景

以“十一五”、“十二五”节能减排和碳减排目标实现的社会发展情况为基础,人口增长、产业结构、能源利用和节能技术等因素的未来发展速率基于“十一五”、“十二五”实施节能减排及碳减排政策的水平设定。基准情景设定基本反映过去十年减排政策引导下的经济发展与碳排放状态。

2.3.2 节能情景

在“十一五”节能减排目标及“十二五”碳减排目标实现的基础上,进一步提高政策措施的约束力度,人口增长、产业结构、能源利用和节能技术等目标的设定更加严格。此时,虽然经济增长仍然是社会发展最主要的目标,但社会整体的节能低碳意识已有很大提升,开始采取各种低碳技术与策略,寻求经济与资源环境的协调可持续发展。节能情景设定基本反映了经济社会在过去十年减排基础上通过更严格的节能减排及碳排放约束政策所能达到的经济发展与碳排放状态。

2.3.3 低碳情景

低碳情景要求全面开展区域经济低碳发展与建设,强调资源环境的可持续发展和经济社会的全

面发展。此时,经济社会在确保基本的经济增长目标的同时,开始改变社会发展及经济增长模式,加快节能低碳技术的发展与应用,改变能源结构及消费方式。低碳情景基本反映了经济社会通过自身的努力,主动约束自己的行为所能实现的碳排放状态。

由于开放 STIRPAT 模型从山西和全国两个层面选择山西碳排放量的影响因素,而区域发展情景设定为基准、节能和低碳三种,这样开放 STIRPAT 模型的情景组合共 9 种(表 1)。

表 1 开放视角的情景分析组合

Table 1 Scenario analysis combinations at open perspective

山西	全国		
	基准情景	节能情景	低碳情景
基准情景	基准-基准	基准-节能	基准-低碳
节能情景	节能-基准	节能-节能	节能-低碳
低碳情景	低碳-基准	低碳-节能	低碳-低碳

2.4 数据来源

采用 1995—2015 年相关数据进行模型拟合。计算涉及到的区域人口、GDP、城市化率、二产比重、可再生能源比重数据来自于《山西统计年鉴(1996—2016 年)》^[23]和《中国统计年鉴(1996—2016 年)》^[24]。山西省碳排放量数据根据各能源种类的消

费量数据及碳排放系数计算得到,主要的能源种类有原煤及洗精煤、焦炭、汽油、柴油、煤油、燃料油、高炉煤气、焦炉煤气、天然气等,最后加上煤炭焦化环节的碳排放,不同能源品种消费的原始数据来自于《中国能源统计年鉴(1996—2016 年)》^[25],碳排放系数数据由 IPCC(2006)^[26]及《综合能耗计算通则》(GB/T2589—2008)^[27]相应数据计算。

3 结果与分析

3.1 山西碳排放量的开放 STIRPAT 模型拟合

为克服自变量之间的多重共线性(多个变量 VIF 值远大于 10),选择偏最小二乘法进行回归。偏最小二乘法将多元回归、主成分分析和典型相关分析结合起来,能够处理多个自变量间存在严重共线性条件下的回归分析,并且具有在最终模型中保留全部自变量等独特优势^[28]。基于偏最小二乘法,根据公式(3)构建山西省碳排放量的开放 STIRPAT 模型(表 2)。

表 2 中,模型 1 和模型 3 是仅选择山西影响因素作为解释变量时的回归结果,模型 2 和模型 4 是仅选择全国层面因素作为解释变量时的回归结果。可以看出,这四个模型的拟合度都较高,在 0.922~0.948 之间,F 统计值较大(sig 值都小于 0.000),并且

表 2 基于偏最小二乘法的开放 STIRPAT 模型结果

Table 2 Open STIRPAT model test results based on PLS method

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8	模型 9
$\ln a$	-11.640	-33.705	-8.220	-38.696	-54.793	-15.590	-19.390	-7.846	-18.870
$\ln P_1$	2.406	—	1.483	—	1.80	1.702	0.860	1.068	0.742
$\ln A_1$	0.163	—	0.108	—	0.172	0.135	0.069	0.081	0.059
$\ln T_1$	0.305	—	0.195	—	0.123	0.232	0.012	0.142	0.101
$\ln U_1$	—	—	0.420	—	—	—	0.256	0.312	0.222
$\ln IN_1$	—	—	0.778	—	—	—	0.780	0.746	0.640
$\ln RE_1$	—	—	0.094	—	—	—	0.027	0.055	0.029
$\ln P_2$	—	3.501	—	2.868	4.507	—	1.389	—	1.186
$\ln A_2$	—	0.172	—	0.138	0.090	—	0.066	—	0.057
$\ln T_2$	—	0.360	—	0.213	0.282	—	0.113	—	0.097
$\ln U_2$	—	—	—	0.548	—	0.510	—	0.313	0.225
$\ln IN_2$	—	—	—	2.681	—	1.986	—	0.524	0.673
$\ln RE_2$	—	—	—	0.223	—	0.238	—	0.198	0.119
F 统计量	281.630	238.360	249.618	231.128	211.129	261.420	249.040	263.706	277.650
(sig.)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)	(0.000)
调整 R^2	0.933	0.922	0.948	0.946	0.955	0.967	0.961	0.963	0.965

注:“—”表示该指标未进入检验模型。

2018年5月

模型1和模型3的拟合度比模型2和模型4的拟合度略大,说明山西碳排放量的开放STIRPAT模型应该以山西影响因素为基础加以构建。模型5—模型9是在山西因素的基础上加入全国层面因素构建而成,与模型1—模型4相比,模型5—模型9的拟合度有了一定的提升,在0.955~0.967之间,F统计值较大(sig值都小于0.000),说明本文提出的开放STIRPAT模型思想是适用的;这些模型都很好的解释了山西碳排放量变动。其中,模型6的拟合度最高,为0.967,F值为261.42(sig值为0.000);并且模型6的解释变量较少,更方便进行情景分析,可用以对山西碳排放峰值进行预测。

为进一步检验模型6的优劣度和可靠性,对回归结果进行变量投影重要性(VIP值)分析和预测分析。一般认为,VIP值大于1的变量重要,在0.5~1.0之间的变量比较重要,而小于0.5为不重要。计算可知, $\ln P_1$ (1.028)、 $\ln A_1$ (1.143)、 $\ln T_1$ (1.013)、 $\ln U_2$ (1.084)和 $\ln IN_2$ (1.130)的VIP值均大于1,而 $\ln RE_2$ (0.838)的VIP值略小于1,说明这些变量都是山西碳排放量的重要影响因素。同时模型6的预测值与真实值之间的散点图呈现出良好的线性关系,说明模型6的拟合结果非常理想。因此,本文选取模型6对山西2016—2040年的碳排放量进行预测。

3.2 情景参数设定

对模型6的解释变量,即山西省人口规模、人均产出、万元GDP能耗和全国的城市化率、二产比重和可再生能源比重等指标,预测时段内(2016—2040年)分别设定低速率、中速率和高速率三种速率。山西省数据,山西省“十三五”有关规划中有相关指标的具体目标设定,分2016—2020年和2020—2040年两大时段设定;而全国数据,由于全国“十三五”规划中没有相应的具体目标,按2016—2040年时段设定。

3.2.1 山西省人口规模

2016—2020年,山西省人口增长的低速率依据“十二五”期间山西人口的实际年增长率确定(4.88‰),高速率根据山西省“十三五”人口发展规划^[29]的目标增长率确定(8‰),取二者的均值为这一时段的中速率。2020—2040年,联合国^[30]预测中国人口将于2030年达到峰值,中国社科院人口与劳动

研究所^[31]认为中国人口最早将于2026年达峰,在放宽计划生育政策的情况下,将于2035年达峰;以此设定山西人口该时段增长的低速率(1.89‰)、中速率(2.77‰)和高速率(3.65‰)。

3.2.2 山西省人均产出

山西“十三五”规划^[32]提出2020年GDP比2010年翻番目标,以此确定2016—2020年时段GDP增长的高速率(7.5%),“十二五”期间山西GDP增速较缓,年均增长6.8%,以此为低速率,中速率取二者均值。2020—2040年,借鉴朱宇恩等^[7]、李善同^[33]、胡鞍钢等^[34]等研究成果,山西GDP增长率取6.4%为高速率,5.8%为低速率,取二者均值为中速率。

3.2.3 山西省万元GDP能耗

山西省“十三五”规划^[32]提出5年间万元GDP能耗下降15%的政策目标,年均下降3.2%,以此设立2016—2020年时段万元GDP能耗下降低速率;朱宇恩等^[7]认为“十三五”期间山西万元GDP能耗下降速率将达到4%,以此为高速率;二者均值为中速率。2020—2040年时段,中国能源研究会^[35]认为,2030年中国万元GDP能耗较2015年下降近一半,以此设定此时段万元GDP能耗下降的低速率2.1%,借鉴朱宇恩等^[7]研究成果,取年均下降3%为高速率,二者均值为中速率。

3.2.4 全国城市化率

近年来中国城镇化进程明显加快。宋丽敏^[36]预测到2030年,中国城市化率将达到60%。李善同^[33]、杨伟民等^[37]学者认为,到2030年,中国城市化率将达到65%左右。而2016年国务院发布的《国家人口发展规划(2016—2030年)》^[38]提出,到2030年,中国城市化率将达到70%。据此,本文设定中国城市化率2030年65%为低速率,2030年70%为中速率;2030年75%为高速率。

3.2.5 全国二产比重

目前,中国产业结构已进入快速调整时期。国家发改委宏观经济课题组^[39]认为,2030年中国二产比重将达到46.3%,李善同^[33]认为,2030年中国二产比重在38.7%~45.6%之间。胡鞍钢等^[40]认为,2030年中国二产比重将下降到30%~36%。借鉴以上分析,本文设定中国二产比重到2030年30%为高速率,38.7%为低速率,取其均值为中速率。

3.2.6 全国可再生能源比重

中国能源研究会^[35]认为到2020年,中国可再生能源利用量将达到7.2亿tce,占能源消费总量的15%,到2030年,利用量将达到11.7亿tce,约占能源消费总量的22%左右。国际可再生能源署^[41]认为到2030年,中国可再生能源比重会在17%~26%之间。借鉴以上观点,本文设定可再生能源比重到2030年达到17%为低速率,22%为中速率,26%为高速率。

根据2.3章节的情景组合设置,对照各因素的参数设定,确定每种情景驱动因素的变化速率如表3所示。

表3 开放视角的各情景组合设定

Table 3 The settings of each scenario combinations at open perspective

情景	P_i	A_i	T_i	U_2	IN_2	RE_2
基准-基准	高	高	低	高	低	中
基准-节能	高	高	低	中	中	中
基准-低碳	高	高	低	低	高	高
节能-基准	中	高	中	高	低	中
节能-节能	中	高	中	中	中	中
节能-低碳	中	高	中	低	高	高
低碳-基准	低	中	高	高	低	中
低碳-节能	低	中	高	中	中	中
低碳-低碳	低	中	高	低	高	高

注:高、中、低分别代表高速率、中速率和低速率。

3.3 开放STIRPAT模型的山西碳排放峰值分析

基于参数设定,预测不同情景下山西省2016—2040年碳排放量(图2)。不同情景组合下,山西碳排放峰值年份与大小不同,按峰值时间分析,低碳-低碳情景与低碳-节能情景峰值最早,2026年达峰;节能-低碳情景和节能-节能情景次之,2030年达峰;基准-低碳情景和基准-节能情景再次之,2035年达峰;基准-基准情景、节能-基准情景和低碳-基准情景在研究时段内无峰值。按峰值大小分析,低碳-低碳情景峰值最小,为17 148.42万t;其次分别为节能-低碳(17 516.60万t)、基准-低碳(17 924.98万t)、低碳-节能(18 359.36万t)、节能-节能(19 171.78万t)、基准-节能(20 167.18万t)、低碳-基准(2040年21 115.5万t)、节能-基准(2040年22 068.04万t)和基准-基准(2040年23 394.75万t)。

由以上分析可知,在全国层面选择节能或低碳

情景下,山西选择基准情景,可以实现在2035年达峰;山西选择节能情景,则2030年达峰;山西选择低碳情景,2026年达峰;但如果全国层面选择基准情景,预测时段内无法达峰。也就是,山西省碳排放峰值预测时段内是否出现主要由全国层面情景选择决定,而2030年之前能否出现则受山西和全国层面情景选择的共同影响:全国层面选择节能或低碳情景,可实现预测时段内(2035年)达峰;同时配合以山西选择节能或低碳情景,可以实现在2030年之前达峰。目前,中国在进一步的节能减排及低碳发展方面已达成共识,2016年底发布的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》^[42]中提出“到2020年,单位国内生产总值二氧化碳排放比2015年下降18%”的相对于“十二五”更为严格的碳减排目标;并提出要通过“优化利用化石能源”、“加快发展非化石能源”等方式以推动“能源利用低碳革命”,通过“加快产业结构调整”、“控制工业领域排放”等措施来“打造低碳产业体系”,以及通过“加快低碳技术研发与示范”、“加大低碳技术推广应用”等手段来“加强低碳科技创新”。也就是,全国层面(包括山西)在能源利用、产业结构和节能技术等方面的碳排放控制将继续趋向于严格,基本吻合本文对区域社会发展的节能情景的设定,鉴于此,本文认为山西2030年之前碳排放达峰可以实现。

同时,图2分析还可以得出,山西碳排放峰值大小主要受全国层面情景选择影响,受山西省情景选择影响较小。以2030年为例,当全国层面选择基准、节能和低碳情景,山西选择基准情景时,碳排放量分别为21 468.17、19 483.83和17 801.71万t;山西选择节能情景时,碳排放量分别为21 124.35、19 171.78

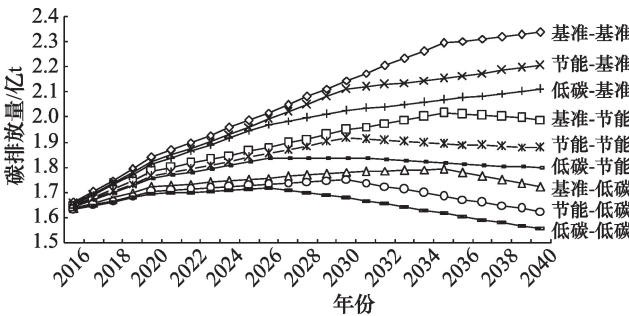


图2 2016—2040年开放视角的山西碳排放峰值预测

Figure 2 Peak prediction of carbon emissions in Shanxi at open perspective from 2016 to 2040

2018年5月

和17 516.60万t;山西选择低碳情景时,碳排放量分别为20 235.35、18 381.29和16 794.36万t。而当山西选择基准、节能和低碳情景,全国层面选择基准情景时,碳排放量分别为21 468.17、21 124.35和20 253.35万t;全国层面选择节能情景时,碳排放量分别为19 483.83、19 171.78和18 381.29万t;全国层面选择低碳情景时,碳排放量分别为17 801.71、17 516.60和16 794.36万t。对比可知,全国层面情景选择变化对山西碳排放峰值大小的影响远远超过山西省情景选择变化的影响。

3.4 开放STIRPAT模型山西碳排放峰值的可控性分析

每种情景组合中,依次强化对一种影响因素的速率约束(从高速率到中速率再到低速率,或者反之),定量分析各因素对山西碳排放峰值的影响,据以研究山西对自身碳排放峰值的可控性。由于只能对山西因素施加影响,分析针对 P_1 、 A_1 和 T_1 展开。

表4给出了依次强化 P_1 、 A_1 和 T_1 速率约束下的山西碳排放峰值预测,可得如下结论。首先,强化 P_1 、 A_1 或 T_1 的速率约束对山西碳排放峰值时间的影响与全国层面的情景选择有关。在全国层面基准情景,强化 P_1 、 A_1 或 T_1 的速率约束,山西碳排放预测时段内无峰值;这与前文分析的在全国层面基准情景,山西碳排放峰值预测时段内无法达峰的结论一致。在全国层面节能或低碳情景,强化 P_1 、 A_1 或 T_1 的速率约束会对山西碳排放峰值时间产生影响。其次,强化 P_1 、 A_1 或 T_1 的速率约束对山西碳排放峰值大小的影响也与全国层面情景选择紧密联系。以山西基准情景,全国层面基准、节能和低碳情景为例,强化 P_1 的速率约束会导致峰值年份山西碳排放量分别减少3005.58万t、2180.13万t和1123.66万t;强化 A_1 的速率约束会导致峰值年份山西碳排放量分别减少716.29万t、393.96万t和350.16万t;强化 T_1 的速率约束导致峰值年份山西碳排放量分别减少

表4 2016—2040年 P_1 、 A_1 或 T_1 约束强化下的山西碳排放峰值预测

Table 4 Peak prediction of carbon emission in Shanxi strengthening P_1 , A_1 or T_1 from 2016 to 2040

(万t)

因素	情景	低速率	峰值时间	中速率	峰值时间	高速率	峰值时间
P_1	基准-基准	20 389.17	无	21 598.48	无	23 394.75*	无
	基准-节能	17 987.75	2026年	18 943.84	2030年	20 167.18*	2035年
	基准-低碳	16 801.32	2026年	17 308.34	2030年	17 924.98*	2035年
	节能-基准	20 832.44	无	22 068.04*	无	—	—
	节能-节能	18 134.66	2026年	19 171.78*	2030年	—	—
	节能-低碳	16 938.54	2026年	17 516.60*	2030年	—	—
A_1	基准-基准	22 678.46	无	23 038.56	无	23 394.75*	无
	基准-节能	19 773.22	2035年	19 968.93	2035年	20 167.18*	2035年
	基准-低碳	17 574.82	2035年	17 748.77	2035年	17 924.98*	2035年
	节能-基准	21 400.85	无	21 732.04	无	22 068.04*	无
	节能-节能	18 926.46	2030年	19 008.80	2030年	19 171.78*	2030年
	节能-低碳	17 292.46	2030年	17 367.69	2030年	17 516.60*	2030年
	低碳-基准	20 793.71	无	21 115.50*	无	—	—
	低碳-节能	18 301.67	2026年	18 359.36*	2026年	—	—
	低碳-低碳	17 078.27	2026年	17 148.42*	2026年	—	—
T_1	基准-基准	23 394.75*	无	22 885.75	无	22 186.76	无
	基准-节能	20 167.18*	2035年	19 827.16	2035年	19 277.32	2035年
	基准-低碳	17 924.98*	2035年	17 622.50	2035年	17 333.95	2035年
	节能-基准	—	—	22 068.04*	无	21 598.48	无
	节能-节能	—	—	19 171.78*	2030年	18 943.84	2030年
	节能-低碳	—	—	17 516.60*	2030年	17 308.34	2030年

注:①“*”表示模型初始状态;②低碳-基准、低碳-节能和低碳-低碳情景, P_1 和 T_1 初始状态即为最强速率约束,故略去;③无峰值情景的碳排放量为2040年碳排放量。

1207.99万t、889.86万t和591.03万t。

强化 P_1 、 A_1 或 T_1 的速率约束对山西碳排放峰值时间及大小的影响受到全国层面情景选择影响,说明山西对自身碳排放峰值缺乏完全可控性。实际上,山西对自身碳排放峰值的可控性可以由公式(3)对模型6计算定量分析。以基准-低碳情景的峰值年(2035年)为例,计算模型6中各因素从低速率向高速率变化,对山西碳排放峰值的影响程度依次为: IN_2 (42.5%), P_1 (26.7%), U_2 (9.8%), RE_2 (8.8%), T_1 (8.4%) A_1 (3.8%)¹⁾;说明山西碳排放峰值变动主要受全国层面影响因素的速率变化影响(61.2%),受山西因素速率变化影响(38.8%)较小。也就是,山西对自身碳排放峰值的可控性较差。

山西对自身碳排放峰值的可控性较差,意味着山西的碳减排努力对峰值的影响相对较小。这就要求山西省在制定碳排放达峰政策时,必须跳出以往仅仅依靠自身努力实现节能减排目标的封闭视角,从开放视角,将全国经济的节能、低碳等发展状况作为区域碳峰值政策的重要约束,制定灵活的碳排放达峰政策。

3.5 封闭STIRPAT模型的山西碳排放峰值对比分析

由于以往文献分析主要从封闭视角展开,为更好理解开放视角对区域碳排放峰值影响,本文给出封闭视角STIRPAT模型山西碳排放峰值预测,并对比分析。

对公式(3),取 $i=1$ 进行回归分析,即为封闭STIRPAT模型,表2模型3为封闭STIRPAT模型回归结果。对比可知,与开放STIRPAT模型相比,封闭STIRPAT模型中解释变量的弹性系数普遍下降,其中,二产比重和可再生能源比重的弹性系数下降幅度最大,分别由开放视角的1.986和0.238下降为封闭视角的0.778和0.094。在封闭视角下,对山西碳排放量影响按大小分别为 P_1 (第二)、 IN_1 (第一)、 U_1 (第三)、 T_1 (第五)、 A_1 (第六)和 RE_1 (第四);括号内为开放视角下(模型6)对应因素弹性系数排序。

1)与以往文献不同,本文结论认为人均产出对山西碳排放峰值影响较小,原因有二:一是弹性系数较小,在开放STIRPAT模型下,山西人均产出的弹性系数只有0.135;其次,变化程度较小,2020—2040年时段,山西GDP的低速增长率为5.8%,高速增长率为6.4%,高低速率的年增长率差值只有0.6%。

2)可再生能源与碳排放量同向变动,意味着研究时段内由于整体经济能源需求的快速上升,可再生能源与化石能源间呈现出互补关系,而非替代关系。

在封闭STIRPAT模型中,维持 A_1 、 P_1 和 T_1 的增长速率,假定山西 U_1 、 IN_1 和 RE_1 指标与全国指标同样速率发展,预测不同情景组合下山西2016—2040年碳排放量(图3)。研究发现,与开放视角相比,封闭STIRPAT模型预测有两点不同,首先,峰值年份推后。预测时段内(2016—2040年),各情景组合都未达到峰值;以基准-低碳、节能-低碳和低碳-低碳情景为例,开放视角下的峰值年份分别为2035年、2030年和2026年;与之相比,封闭视角下的峰值预测年份分别推后达5年、10年及14年以上。其次,碳排放量被高估。同样以基准-低碳、节能-低碳和低碳-低碳情景为例,在开放视角的峰值年2035年、2030年和2026年,封闭视角碳排放量分别达到22 666.31、21 281.8和20 012.5万t,比开放视角分别超出4741.32、3765.2和2864.08万t,高估分别达到26.45%、21.5%和14.31%。

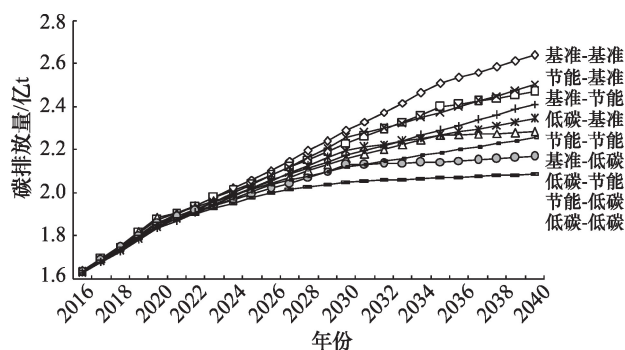


图3 2016—2040年封闭STIRPAT模型山西碳排放峰值预测
Figure 3 Peak prediction of carbon emission in Shanxi at the closed STIRPAT model from 2016 to 2040

封闭STIRPAT模型,在预测时段内,山西碳排放要实现达峰,就必须对影响因素施以更强约束。假设 A_1 、 P_1 和 T_1 速率不变,改变 U_1 、 IN_1 和 RE_1 速率,利用封闭STIRPAT模型对比分析。表5给出了低碳-低碳情景,控制指标不同速率下的峰值预测。由于研究时段内, RE_1 与碳排放量同向变动²⁾,表5只给出了 U_1 和 IN_1 的不同速率下的碳峰值预测。结果显示,封闭STIRPAT模型中,预测时段要达到峰值,

2018年5月

表5 2016—2040年低碳-低碳情景控制指标

不同速率的峰值预测

Table 5 Peak prediction of low carbon-low carbon scenario
controlling index at different rates from 2016 to 2040

控制指标	控制目标	峰值时间	峰值额/万 t
U_i	2030年=65%*	无	—
	2035年=65%	无	—
	2040年=65%	2030年	19 946.75
IN_i	2030年=32%*	无	—
	2030年=31%	无	—
	2030年=30%	2035年	19 481.00

注:“*”为封闭模型指标初始值。

就必须强化对 U_i 和 IN_i 速率约束。由此得出结论,封闭视角的 STIRPAT 模型会低估各因素对区域碳排放量的影响,以此制定碳峰值方案,会导致地方政府对影响因素约束的过度强化,对区域经济发展不利。

4 结论与建议

4.1 结论

本文以能源生产区域山西为例,将区域经济的分工合作及相互依赖纳入分析,从山西和全国两个层面选择驱动因素,构建开放 STIRPAT 模型,并结合情景分析方法对山西省 2016—2040 年碳排放峰值进行预测;以此为基础,分析山西省碳排放峰值的可控性及传统封闭视角对区域碳排放峰值政策制定及执行的不利影响。结论如下:

(1) 开放 STIRPAT 模型中,山西省碳排放峰值预测时段内是否出现主要由全国层面情景选择决定;而 2030 年之前能否出现则受山西和全国层面情景选择的共同影响:全国层面选择节能或低碳情景,可实现预测时段内(2035 年)达峰;而同时配合以山西选择节能或低碳情景,可以保证在 2030 年之前达峰。由于中国在进一步的节能减排及低碳发展方面已达成共识,全国各个层面碳减排控制将继续趋向于严格,本文认为山西 2030 年之前达峰是可以实现的。同时山西碳排放峰值大小也主要受全国层面情景选择影响,受山西省情景选择影响较小。

(2) 山西对自身碳排放峰值缺乏完全可控性,山西影响因素速率约束强化对峰值时间及大小的影响取决于全国层面的情景选择;计算可知,山西碳排放峰值变动主要受全国因素速率变化影响

(61.2%),受山西因素速率变化影响(38.8%)较小。山西对自身碳排放峰值的可控性较差,山西的碳减排努力对山西碳排放峰值的影响相对较小。

(3) 与开放 STIRPAT 模型相比,封闭 STIRPAT 模型会推迟山西省的碳峰值年份并高估其碳排放量。对山西碳排放峰值,运用封闭 STIRPAT 模型预测,所有的情景组合在预测时段都未达到峰值。封闭 STIRPAT 模型,要实现在预测时段内达峰,就必须对影响因素施加更强的约束,从而导致地方政府对碳排放达峰影响因素约束的强化,对区域经济的发展不利。

4.2 建议

在制定区域碳排放达峰政策及控制方案时,山西省必须跳出以往仅仅依靠自身努力实现节能减排目标的封闭视角,从开放视角,特别关注全国经济的节能、低碳等发展状况,将其作为区域碳排放峰值政策的重要约束因素,制定灵活的碳排放达峰方案:

(1) 要强化自身的节能减排能力,为碳排放量尽早达峰努力;要认识到区域碳排放峰值很大程度上受到由全国二产比重、城市化率等指标决定的全国层面情景选择的影响,防止为完成碳排放峰值任务而对本区域经济指标制定苛刻而僵化的目标要求,避免碳排放控制方案对区域经济发展可能产生的不利影响。

(2) 山西还必须认识到,传统封闭视角分析会低估各影响因素对区域碳排放峰值的影响,以此为依据制定碳排放控制方案,同样会导致地方政府对影响因素约束的强化,对区域经济的发展不利。

(3) 对中央政府而言,在分解制定区域的碳排放达峰任务及相关目标时,不仅要考虑中国东部、中部和西部区域发展阶段的差异性,更要考虑区域经济分工合作及相互依赖等因素对区域碳排放峰值的影响,制定合理的区域碳排放达峰方案。

参考文献(References):

- [1] 柴麒敏. 迈向 2030 中国的低碳政策展望[EB/OL]. (2015-06-29)[2017-06-13]. http://www.p5w.net/news/xwpl/201506/t20150629_1103335.htm. [Chai Q M. Toward 2030 China's Low Carbon Policy Outlook[EB/OL]. (2015-06-29)[2017-06-13]. http://www.p5w.net/news/xwpl/201506/t20150629_1103335.htm.]

- [2] 宗蓓华. 战略预测中的情景分析法[J]. 预测, 1994, (2): 50-52. [Zong B H. Scenario analysis method in strategic forecasting[J]. *Forecasting*, 1994, (2): 50-52.]
- [3] Chermak T J. Studying scenario planning: Theory, research suggestion, and hypotheses[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2005, 72(1): 59-73.
- [4] 蒋克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国2050年的能源需求与CO₂排放情景[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 269-302. [Jiang K J, Hu X L, Zhuang X, et al. China's energy demand and greenhouse gas emission scenarios in 2050[J]. *Sino-Global Energy*, 2008, 4(5): 269-302.]
- [5] 付加锋, 刘小敏. 基于情景分析法的中国低碳经济研究构建与问题探索[J]. 资源科学, 2010, 32(2): 205-210. [Fu J F, Liu X M. A framework for China's low carbon economy on the basis of scenario analysis and discussion on relevant issues[J]. *Resources Science*, 2010, 32(2): 205-210.]
- [6] 王宪恩, 王泳璇, 段海燕. 区域能源消费碳排放峰值预测及可控性研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(8): 9-16. [Wang X E, Wang Y X, Duan H Y. Forecasting area's carbon emissions of energy consumption and controllability study[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(8): 9-16.]
- [7] 朱宇恩, 李思芬, 王云, 等. 基于IPAT模型和情景分析法的山西省碳排放峰值年预测[J]. 资源科学, 2016, 38(12): 2316-2325. [Zhu Y E, Li S F, Wang Y, et al. Peak year prediction of Shanxi Province's carbon emissions based on IPAT modeling and scenario analysis [J]. *Resources Science*, 2016, 38(12): 2316-2325.]
- [8] 邓小乐, 孙慧. 基于STIRPAT模型的西北五省区碳排放峰值预测研究[J]. 生态经济, 2016, 32(9): 36-41. [Deng X L, Sun H. Forecast of the northwest five province's carbon emissions based on STIRPAT model[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(9): 36-41.]
- [9] Ehlich P, Holden J. Impact of population growth[J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [10] Commoner B. Making Peace with the Planet[M]. New York: New Press, 1992.
- [11] Dietz T, Rose E A. Effects of population and affluence on CO₂ emissions[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 1997, 94(1): 175-179.
- [12] Cramer J C. Population growth and air quality in California[J]. *Demography*, 1998, 35(1): 45-56.
- [13] 陈操操, 刘春兰, 汪浩, 等. 北京市能源消费足迹影响因素分析-基于STIRPAT模型和偏最小二乘模型[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1622-1632. [Chen C C, Liu C L, Wang H, et al. Examining the impact factors of energy consumption related carbon footprints using the STIRPAT model and PLS model in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(6): 1622-1632.]
- [14] 陈庆, 周敬宣, 李湘梅, 等. 基于STIRPAT模型的武汉市环境影响驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(S1): 100-104. [Chen Q, Zhou J X, Li X M, et al. Analysis on the driving force of environmental impact in Wuhan based on STIRPAT model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(S1): 100-104.]
- [15] 张乐勤, 李荣富, 陈素平, 等. 安徽省1995年-2009年能源消费碳排放驱动因子分析及趋势预测-基于STIRPAT模型[J]. 资源科学, 2012, 34(2): 316-327. [Zhang L Q, Li R F, Chen S P, et al. Trend prediction and analysis of driving factors of carbon emissions from energy consumption during the period 1995-2009 in Anhui Province based on the STIRPAT model[J]. *Resources Science*, 2012, 34(2): 316-327.]
- [16] 李春华, 李宁, 石岳. 基于STIRPAT模型的长沙市耕地面子变化驱动因素分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(3): 258-263. [Li C H, Li N, Shi Y. A study of arable quantity in Changsha based on STIRPAT model [J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2010, 26(3): 258-263.]
- [17] 吴敬锐, 杨兆萍, 阿达依赛肯. 基于STIRPAT模型分析新疆能源足迹的影响因素[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 187-193. [Wu J R, Yang Z P, Adayi S K. Impact factors and temporal variation of environmental pressure of Xinjiang based on STIRPAT model[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(1): 187-193.]
- [18] 徐忠民, 程国栋. 中国人口和富裕对环境的影响[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 767-773. [Xu Z M, Cheng G D. Impacts of population and affluence on environment in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(5): 767-773.]
- [19] 郭丕斌, 吴青龙, 周喜君, 等. “全产业链”理论与应用研究-以山西为例[M]. 北京: 经济管理出版社, 2014. [Guo P B, Wu Q L, Zhou X J, et al. Whole Industry China Theory and Applications: Shanxi As a Case[M]. Beijing: Energy Management Press, 2016.]
- [20] 杨花, 杜斌, 吕锋骅, 等. 基于IPCC排放清单和LEAP模型的山西省CO₂排放研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(3): 103-109. [Yang H, Du B, Lv F H, et al. Study on CO₂ emissions in Shanxi Province base on IPCC listing and LEAP model[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(3): 103-109.]
- [21] Barners D F, Krutilla K, Hyde W F. The Urban Household Energy Transition: Social and Environmental Impacts in the Developing World[M]. New York: Rff Press, 2005.
- [22] 林伯强, 刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放: 影响因素和减排策略[J]. 经济研究, 2010, (8): 66-78. [Lin B Q, Liu X Y. China's carbon dioxide emissions under the urbanization process: Influence factors and abatement policies[J]. *Economic Research Journal*, 2010, (8): 66-78.]
- [23] 山西省统计局. 山西省统计年鉴(1996-2016)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997-2017. [Shanxi Provincial Bureau of Statistics. Shanxi Statistical Yearbook 1996-2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 1997-2017.]
- [24] 国家统计局. 中国统计年鉴(1996-2016)[M]. 北京: 中国统计出

- <http://www.resci.cn>

11/04/content_5128619.htm. [The State Council. The 13th Five-Year Work Plan for Controlling Greenhouse Gas Emissions[EB/

OL]. (2016– 10– 27) [2017– 06– 25]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm.]

Peak regional carbon emissions based on open STIRPAT modeling in an energy-producing region of Shanxi

WU Qinglong¹, WANG Jianming¹, GUO Pibin²

(1. *School of Economics and Management, North University of China, Taiyuan 030051, China;*

2. *Taiyuan Normal University, Taiyuan 030619, China*)

Abstract: Cooperation and interdependence among regional economies influences peak regional carbon emissions. Using an energy-producing region in Shanxi, China as an example, we built an open STIRPAT model by selecting driving factors provincially and nationally. We then used scenario analysis to predict peak carbon emissions from 2016 to 2040. The results show that when factors at the national level choose energy-saving or low-carbon scenarios, the peak in carbon emissions for Shanxi occurs in 2035. At the same time, by choosing energy-saving or low-carbon scenarios in Shanxi to match it, the peak can be achieved in 2030. With strict current national carbon emissions controls, peak carbon emissions for Shanxi are achieved in 2030. The peak value of carbon emission in Shanxi is mainly affected by the choice of carbon emission reduction scheme at the national level, and less affected by choices within the province. The controllability of Shanxi and its carbon emissions is poor, and its own emission reduction efforts have limited impact on regional peak values and the year of peak carbon emissions. Compared with the open view, the closed STIRPAT model will delay the peak emission and mean that Shanxi fails to achieve its peak value in the forecast period. Therefore, Shanxi should pay special attention to the energy saving development of the whole country from an open angle and make it an important constraint factor in the formulation of Shanxi's peak carbon policy to formulate a flexible carbon emission peak scheme.

Key words: open STIRPAT model; carbon emission; peak prediction; Shanxi Province