

Studies on the Carbon Emission Peak of China in 2030: A Review

Xiaxiang Li¹, Xuezhen Zhang^{2,3}, Fang Wang², Lijuan Zhang¹

¹Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

²Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing
Email: xzzhang@igsrr.ac.cn

Received: Jan. 21st, 2017; accepted: Feb. 18th, 2017; published: Feb. 21st, 2017

Abstract

The carbon emission peak of China is an international focus. Here, we carried out a literature review for the studies on the carbon emission peak of China in 2030 to summarize the study progresses. The literature review shows that these studies mostly were achieved by using models. There are generally three categories of models, which are decomposition models, top-down models and system optimized models. These model-based studies show that carbon emissions of China would peak around 2030 in the conditions of changing energy structure and industrial structure, transforming the development mode, promoting clean energy and appropriately increasing carbon sequestration ability. At the level of provinces, the peak of carbon emissions would as well as occur around 2030 with the supports of localized development road under the national macro policies. However, we should pay attentions on the uncertainties of these model studies. These uncertainties might be derived from the model parameters, performances of entire model, and geopolitical conditions.

Keywords

China, Carbon Emission Peak, Around 2030

中国2030年碳排放达峰研究进展

李侠祥¹, 张学珍^{2,3}, 王芳², 张丽娟¹

¹哈尔滨师范大学, 黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

²中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京

³中国科学院大学, 北京

Email: xzzhang@igsrr.ac.cn

收稿日期：2017年1月21日；录用日期：2017年2月18日；发布日期：2017年2月21日

摘要

中国碳排放峰值是当前国际社会关注的焦点，本文通过文献调研和分析，梳理了这方面的研究进展。目前，碳排放峰值研究的主要手段是模型模拟，其中比较常用的有三类模型，分别是指标分解法模型、自上而下的模型以及系统优化模型。研究发现，我国碳排放可在2030年左右达峰，其前提条件是：积极调整产业结构、能源结构，加快转变发展模式，鼓励推广清洁能源，以及恰当增强碳汇能力；在国家的宏观调度下，各省(市)通过制定“因地制宜”的达峰方案，也均可在2030年左右实现碳排放达峰。不过，模型及其参数对未来社会经济发展情景的适应性、本地化模型的性能以及因地缘环境演变导致的模拟不确定性等还需进一步评估。

关键词

中国，碳排放峰值，2030年左右

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

改革开放以来，中国经济稳步、高速增长，于2010年GDP总量超过日本成为世界第二大经济体。随着经济快速发展，中国碳排放总量也在急剧增加，于2007年超过美国和欧盟，跃居世界首位。目前，在国际减排压力日益增加的严峻形势下，中国的碳排放成为全球关注的焦点之一。作为对全球事务负责任且有担当的大国，中国与美国于2014年11月联合发布《中美气候变化联合声明》，承诺碳排放将在2030年左右达峰并争取尽早达峰，并且在2015年12月的巴黎气候大会上中方重申了这一承诺。“承诺”不仅从国内经济社会可持续发展角度做出了现实选择，而且回应了国际社会对中国及全球气候变化的关切，彰显了中国政府对碳减排的高度重视和坚定决心，受到国际社会的高度评价。

目前我国仍处于工业化和城镇化快速发展时期，正是高能耗，求发展的阶段。在如此情形下，我国碳排在2030年左右达峰的路径及对经济的影响，以及政府应采取怎样的政策以求得达峰等问题成为我们亟待研究解决的课题。近来，国内外学者针对中国碳排放达峰问题已经展开了诸多研究，本文拟针对碳排放达峰的主要研究方法，2030年左右中国碳排放达峰的路径、对策及典型省市的达峰时间、路径及对策等方面予以梳理，以期为中国及各省(市)顺利实现碳排放达峰目标及后续相关研究提供参考。

2. 研究进展

2.1. 碳排放达峰的研究方法

碳排放峰值预测的研究手段通常是模型模拟。目前应用到中国碳排放峰值研究的主要模拟方法大致分为三类(见表1)[1]：第一类是基于指标分解法的模拟，采用的模型主要有IPAT和STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on PAT)；第二类是自下而上的模拟方法，采用的模型主要为LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System)；第三类是基于系统优化模型的模拟，采用的模型主要包括MARKAL-

Table 1. Common modeling methods for carbon emission peak prediction**表 1.** 碳排放峰值预测的常用建模方法

建模方法	代表模型	方法特性	方法应用
指标分解法	IPAT; STIRPAT	以分解公式和指标体系, 对 CO ₂ 排放进行指标分解, 主要应用于国家尺度。	Ehrlich P R 等[4] York R 等[6]
自上而下分析法	LEAP	以部门历史数据为基础, 通过情景模拟预测未来的 CO ₂ 排放。	Wang K 等[9]
系统优化法	MARKAL-MACRO; IESOCEM; IPAC	通过线性或非线性数学方法动态模拟能源市场的变化。	陈文颖[18] 毕超[19] 姜克隽等[20] [21]

MACRO 模型、IESOCEM (Intertemporal Energy System Optimization and Carbon Emission Model)模型和中国能源环境综合政策评价模型(IPAC)等[2] [3]。另外, 环境库兹涅茨曲线模型(EKC)在碳排放的峰值预测研究中也应用。

指标分解模拟法从影响碳排放的因素入手, 首先将碳排放的影响因素进行分解, 再基于分解结果对碳排放趋势进行模拟预测。IPAT 模型[4]是该方法的具体实现之一, 它将环境影响(I)分解为人口(P), 富裕度(A)和技术(T)三个要素作用的结果, 由此形成了 IPAT 模型的一般方程形式: $I = PAT$, 该方程将环境影响和人口规模、人均财富以及对环境影响的技术水平联系起来。在碳排放研究领域, 环境影响(I)即为碳排放量, P 为人口数量、A 为人均 GDP, T 为能源强度。IPAT 模型为探究人口、经济和技术对碳排放的影响提供了有效工具。随后, Waggoner 和 Ausubel [5]将技术水平 T 又分解成了单位 GDP 所消耗的技术(C)与单位技术对环境的影响(T)之积, 由此演变出“ImPACT”模型的一般方程, 即 $I = PACT$ 。然而, IPAT 模型与 ImPACT 模型尚存在一定局限性, 即, 各因素之间是独立的, 一个因素变化时, 其他因素不受其影响而相应变化, 不能反映社会经济“复杂耦合系统”的特征。为了弥补这一不足, 分析人口对环境的非线性变化影响, York 等[6]在 IPAT 模型的基础上建立了 STIRPAT 模型, 即: $I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i$ 。通过对数变化得到其加法形式的方程: $\ln I_i = a + b \ln P_i + c \ln A_i + d \ln T_i + e_i$, 渠慎宁等[7]、马宏伟等[8]利用该模型对未来中国碳排放峰值进行了预测研究。通常做法是利用历史数据根据最小二乘原理拟合出模型中各项变量的系数, 然后再利用未来各变量的情景, 预测未来的碳排放。

LEAP 模型是自下而上分析方法的典型代表之一, 是由瑞典斯德哥尔摩环境研究所开发的基于情景分析的经济-能源-环境复杂系统综合建模平台[9]。该模型的主要优势在于考虑到了能源是横跨经济、环境、社会等多领域的复杂系统, 而不是仅仅将其理解为单一系统。具体表现为, 该平台在能源需求分析方面兼有部门分析法及投入产出法的特点, 同时将资源禀赋、能源价格及投资等影响能源供给的因素纳入模型框架。在实际应用中, 一般根据能源需求与经济发展之间的关系, 以单位产值的能源消费量反映系统内各部门的能源利用水平, 通过对未来可能的经济发展及单位产值能耗的情景假设, 得到各情景下能源需求总量及其能源结构分配, 并计算对应的污染物排放量。LEAP 模型已被广泛应用到国家、省市及行业层面的能源规划、能源需求等研究中[10] [11] [12], 比如常征等[13]、龙妍等[14]基于 LEAP 模型构建的 LEAP-shanghai 模型、LEAP-湖北模型等。鉴于该模型的最大优势是从整体性出发描述了经济 - 能源 - 环境复杂系统, 因而预测分析过程不可将复杂的能源系统简单的人为分割, 这会忽视了能源作为一个动态系统的整体性, 导致结论主观性[13]。

系统优化模型即混合能源模型, 该类模型可以同时对技术和经济进行详细描述, 功能齐全, 结构复杂, 属于对现实能源系统模拟和仿真的巨系统, MARKAL-MACRO 模型、IESOCEM 模型和 IPAC 模型便是典型代表。MARKAL-MACRO 模型是由 MARKAL 模型与 MACRO 模型耦合而成, 是一个考虑能源

系统与宏观经济的动态非线性规划模型,其目标函数是规划期内消费的总贴现效用最大。其中,MARKAL模型是以技术为基础的能源市场分配的长期动态线性规划模型,详细描述了能源系统中各种能源开采、加工、转换、输送和分配环节以及终端用能环节。MARKAL模型主要用于研究国家级或地区级的能源规划和政策分析,比如何旭波[15],陈文颖等[16],Chen C等[17]。MACRO模型通过生产函数来描述能源消费、资金、劳动力和经济产出GDP的关系,目标函数是寻求总的能源折现效用最大,模型最大的效用函数决定了一系列最优储备、投资、消费的结果。MARKAL模型中各部门的能源服务需求是外生给定参数,不能反映能源价格对其的影响,因此MARKAL模型与MACRO模型通过能源服务需求实现耦合。陈文颖[18]结合中国发展特征,对MARKAL-MACRO模型进行改进,发展了中国MARKAL-MACRO模型。

IESOCEM模型是毕超[19]基于清华大学能源-环境-经济综合评价模型和2013年我国能源参考系统(Reference Energy System)建立的。IESOCEM模型涵盖了能源资源储量或产能、能源开采(进口)技术、一次能源、能源转换技术、终端能源消费需求、终端用能技术、能源服务需求等多个环节。模型的经济技术参数包括:各种能源资源可采储量(年最大产能)、能源经济指标(年利用小时数、年可利用率、运行寿命、建设期、系统效率、单位投资、年运行费用)等;政策参数为已出台的能源发展政策目标约束;求解的目标函数为能源系统总成本最小化。

IPAC模型是由姜克隽等[20][21]考虑中国实际情况开发搭建的包括多种方法论的模型,主要由能源与排放模型、环境模型和影响模型三部分组成。其中,能源与排放模型中涵盖了可计算一般均衡模型(CGE模型)、部分均衡模型(IPAC-e排放模型)、最小成本优化模型(IPAC-tech技术评价模型)等多种不同类型的模型,是IPAC模型的主要构成部分。环境模型中包括了一个计算不同污染物浓度的大气扩散模型(IPAC-air地区扩散模型)和一个计算未来升温情况的简单气候模型(IPAC-Climate模型)。影响模型中包括一个用来分析污染和升温对人体健康影响的IPAC-Health健康影响模型和一个分析气候变化对水资源影响的IPAC-Water水资源影响模型。

全球气候变化综合评估模型(IMAC)是在低碳能源与经济模型(Low Carbon Energy & Economy, LCEM)的基础上进一步优化开发而得[22]。LCEM模型由清华大学能源环境经济研究所自主开发,是由低碳经济模型(LCEC)、低碳能源模型(LCEN)及农业及土地利用模型(AFLU)三个次级模型耦合而成的低碳发展综合评估模型,属于全球模型。IAMC模型主要针对中国区域问题,是在LCEM模型的基础上进一步耦合了简化气候模型(GICM)和区域影响与适应模型(RIAM)等其他模块构建而成的动态混合模型体系,主要用于分析中长期全球温室气体排放和应对气候变化的政策及技术战略。在碳排放的峰值研究中,该模型能够对社会经济发展领域进行全局考虑,识别出有关发展模型平稳转变的实质问题和风险,即通盘考虑了中国排放峰值问题和社会经济发展[23]。

除了上述“工具化”的模型,EKC曲线理论也被用于碳排放的峰值预测研究。该理论认为环境质量随着经济增长呈先恶化后改善的倒U型关系,模型框架可表述为: $\ln(C_{it}) = \alpha_0 + \beta_1 \ln(\gamma_{it}) + \beta_2 \ln(\gamma_{it})^2 + \varepsilon_{it}$,其中C为人均碳排放, γ 为人均GDP。虽然这一关系颇受争议,但通过实证研究发现,我国碳排放和经济增长间确实存在EKC曲线。比如,郑海涛等[24]根据环境库兹涅茨曲线,构建了中国地级城市碳排放与经济发展关系的经济计量模型,发现中国城市碳排放轨迹遵循倒“U”型,并据此进一步测算了各城市2030年达峰的可能性。林伯强和蒋竺均[25]构建了中国全国尺度的EKC模型,通过与实证预测对比发现,只有人均收入作为解释变量的EKC模型只能用来描述过去的排放状况,不能用来预测将来的排放拐点,因为未来的产业结构和能源结构极大的影响排放量。

总体来看,目前应用于碳排放达峰研究的模型种类多样,繁简不一。统计模型通常需要历史数据率定其参数,然后再基于一定的社会经济情景进行外推。这就要求历史数据率定出来的参数适用于未来的

社会经济情景，否则该模型的预测功能将非常有限。相对而言，动力过程模型在一定程度上克服了这一弱点，比如荷兰公共卫生与环境国家研究院的 IMAGE 模型、日本理工大学的 MARIAM 模型、美国西北太平洋国家实验的 MiniCAM 模型、日本国立环境研究所的 AIM 模型、奥地利国际应用系统分析研究所的 MESSAGE 模型等。另外，大部分模型都是由发达国家的学者首创的，模型中弹性、参数在中国的适用性需引起重视，因为模型参数的取值对结果影响很大，因而在模型预测排放峰值时应将更多的精力放在模型之外的实际调研工作中，以获取区域本土化的模型参数[2]。

2.2. 2030 年左右达峰实现水平及对策建议

目前，多数研究认为中国在 2030 年左右具备实现碳排放达峰的条件，能够顺利实现达峰承诺(见表 2)。比如，何建坤[26] [27]和柴麒敏、徐华清等[23]认为，中国 2030 年左右可以实现碳排放达峰，并且是实现达峰的较好机会。综合二者研究发现，中国 2030 年二氧化碳排放峰值可控制在 120 亿吨和人均 8.5 吨之内，二氧化碳排放强度相对 2005 年降低到 65% 以上，非化石能源比重可达 20%~25%。这些研究为中国实现达峰目标提供了理论基础。同时，杜强等[28]、周伟等[29]也通过模拟分别发现，中国二氧化碳排放峰值将出现在 2030 年和 2031 年，峰值约为 135.20 亿吨和 94.72 亿吨。考虑到碳减排会对经济平稳发展带来影响，因此王铮、朱永斌[30]在经济最优增长且避免经济危机的情况下对我国碳排放进行了预测，结果发现，我国能源净碳排放将在 2033 年左右达峰，峰值排放量低于 27.48 亿吨碳(约为 100.85 亿吨二氧化碳)，人均碳排放约为 1.78 吨碳(约为 6.52 吨二氧化碳)。另外，何建坤[28]指出，到 2030 年中国 GDP 总量大约为 2010 年的 3.5 倍，单位 GDP 的二氧化碳排放强度年下降率将不低于 4.5%，可保证 GDP 年均 4.5% 左右的增速，符合中国经济社会发展规律，可以保证中国经济的平稳发展，并且达峰目标的确立也有利于加快转变经济发展方式。朱永斌[31]和姜克隽等[20]研究发现，中国若在 2030 年左右实现达峰，未来经济增速将逐渐趋缓，并且姜克隽等认为，在 2000~2050 年中国 GDP 增速约为年均 6.4%，其中 2010~2020 年约为 8.38%，2020~2030 年约为 7.11%，2030~2040 约为 4.98%，2040~2050 约为 3.60%，2050 年 GDP 总量将为 2010 年的 3 倍。

由此可见，中国碳排在 2030 年左右具备实现达峰的可能性，但是以什么样的路径达峰各学者众说不一。若要实现且以较高的水平实现，制定清晰明确的战略思路，超前部署，采取强有力的政策和措施十分重要[28]。首先，能源消费作为碳排放的主要来源，其结构的改善必不可少，必须改变煤炭长期占据我国能源构成 60% 以上的现状。在过去 20 年，我国对能源构成的调整幅度相对较小，非化石能源占比仅上升 3.5%，煤炭占比仅下降 8.2%，石油、天然气分别上升 2.4% 和 2.3% [33]，可见能源结构调整的减排空间十分巨大，大力开发和利用非化石及可再生能源并加快对化石能源消费存量的替代对顺利实现减排目标具有重要意义。从政策上讲，必须加大对煤炭和煤电建设的控制力度，控制当下出现能源大量过剩，低碳优质能源发展受限的局面，加大对核电、水电、风电、太阳能发电发展的扶持和鼓励力度。迅速推广天然气管网和储气设备的构建，加大对重点用煤领域的改革力度，提倡“以气代煤”。并提倡全民参与资源利用的集约型，能源消费低碳化行动[19] [34]。在技术上，鼓励发展先进技术，并尽快掌握再生能源技术的核心。

其次，产业结构的调整也是减排的重要举措。据国家统计局工业化水平综合指数和社科院《中国工业化进程报告》，中国在 2010 年工业化水平已达 60% 或以上，整体处于后工业化时期，但在中国所有部门中，工业部门仍是碳排放大户，其碳排放量约占碳排放总量的 70%。因此优化产业结构的同时，加大对工业部分的整改力度显得尤为重要。中国东西部资源禀赋具有明显差异，东部资本充足而劳动力短缺，西部劳动力充足而资本短缺，产业结构优化可充分利用此特征，将东部劳动力相对密集型产业转向西部，促进西部结构优化，实现东西优势互补[35]。在工业部门的整改中，也应该因地制宜。虽然中国整体处于

Table 2. The studies on the carbon emission peak of China around 2030
表 2. 2030 年前后中国二氧化碳排放峰值预测研究

研究方法	达峰时间	二氧化碳峰值(亿吨)	人均二氧化碳排放(吨/人)	二氧化碳强度	峰值 GDP 增长率	文献
情景分析	2030	<110.00	<8	比 2010 年下降约 60% [32]	4.5%	何建坤[28]
IAMC 模型	“十五五”末期	120.00	8.5	相比 2005 年降低至 65% 以上	—	柴麒麟、徐华清[23]
IPAC 模型	2030 年	81.77	5.56	—	4.98%	姜克隽、胡秀莲等[20]
IPAT 模型	2030 年	135.20	9.72	—	—	杜强、陈乔等[29]
EKC 理论	2033 年	100.85	6.52	—	—	王铮、朱永斌等[31]
MARKAL-MACRO 模型	2031 年	94.72	~6.51	—	—	周伟、米红[30]

后工业发展阶段，但是东西部发展也存在明显差异，东部地区应鼓励低能耗先进装备制造业的高新技术产业发展，重点实现清洁能源的替代，以技术创新驱动工业碳减排，实现率先达峰，西部地区的重工业在短期内可以先以弱化对煤炭的依赖性，加大“煤改气”的发展为主，与此同时，也应引进先进技术，逐步淘汰能耗高、污染大、产能低的落后产业，严格控制碳排放强度和排放总量，将其纳入地方政绩考核范围，并对各区域减排效果实施评价。

最后，灵活利用碳汇技术减碳[36]。森林、草地、湿地、水体等具有很好的碳汇能力，应根据各地区实际情况，灵活采用碳汇手段，换取更多的碳排放权。

2.3. 典型省市碳排放达峰时间、路径及对策建议

在《中美联合气候变化声明》和《巴黎协定》中，中国承诺碳排放将在 2030 年前后达峰，达峰时的碳排放强度较 2005 年下降 60%~65%，非化石能源占一次能源消费比重提升到 20% 左右，森林蓄积量较 2005 年增加 45 亿立方米。为努力实现 2030 年左右碳排放达峰并尽早达峰的目标，在国家整体宏观调度下，各省(市)提出符合各自实际情况的最佳达峰目标是全国碳排放顺利达峰的基础。目前，关于东、中、西部不同经济发展水平省(市)的达峰时间与路径均有一定的研究成果。这些研究成果表明，在一定政策支持下，我国各省(市)基本都能于 2030 年左右实现碳排放达峰，但是具体因地制宜。具体来说：

作为西部地区经济发展的领头军，甘肃省改革开放后经济发展十分迅速，具备完善的工业体系，其顺利实现达峰可以增强西部地区完成减排目标的信心，并带动周边地区达到减排目标。甘肃省工业体系完整，但产业结构不合理，耗能大且利用率低，产业创新性差，并且生态环境相对脆弱，其碳排放主要来源于第二产业，并且能源消费主要以煤炭、石油为主。这也是西部地区的共同特征。通过情景模拟研究发现，若甘肃人口及各行业的产品产量在 2035 年左右能够达到峰值，能源利用效率增加 35%，第二产业、第三产业所占比重能在 2050 年分别达到 35% 和 50%，且此时化石能源所占比重达到 65%，那么甘肃省碳排放量可在 2030 年左右达峰，达峰碳排放量为 2.51 亿吨[37] (如图 1)。可见，甘肃省顺利实现达峰目标并非一蹴而就的事情，需要有效的政策支持。首先，优化产业结构，调整工业结构，限制能耗大、排放高的产业，发展技术创新、战略性新兴产业和现代服务业，增加长期发展的后劲[38]。另外，调整能源消费结构，降低化石能源占比，提高能源利用效率，并且还应逐渐开发核能、风能、太阳能等无碳清

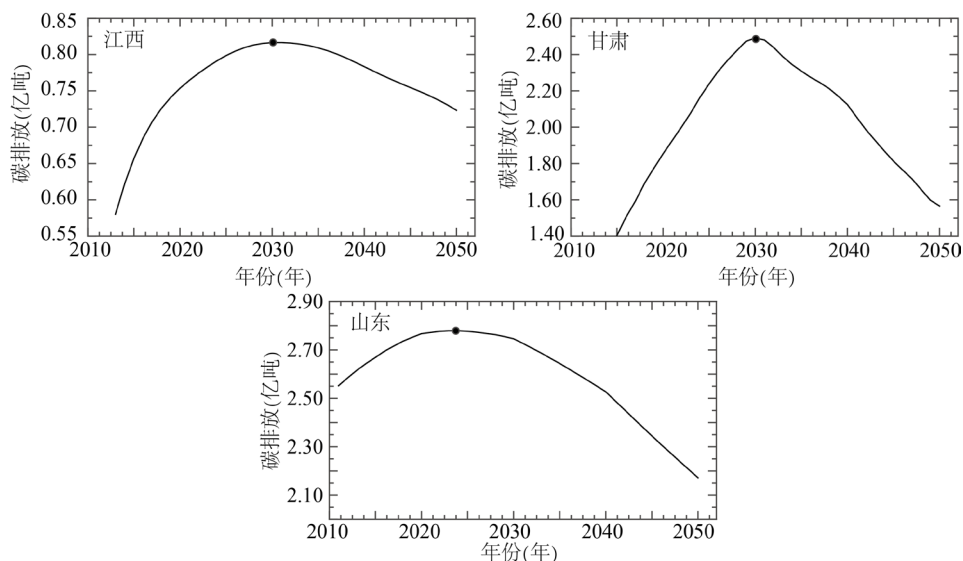


Figure 1. Carbon emission peak forecast of Jiangxi [3], Gansu [37] and Shandong [42]
图 1. 江西[3]、甘肃[37]、山东[42]碳排放峰值预测

洁能源[39] [40]。此外，由于西部地区生态脆弱，在发展新型产业，发展新能源的同时，还应建立生态补偿机制，并在适宜区域大力展开植树造林活动，增加森林固碳量。

山东省是东部典型沿海省份，改革开放以来迅速发展，不论经济发展还是能源消耗，都处于东部地区的前列。山东省达峰的研究成果，可为东部沿海城市选择顺利达峰的路径提供参考。山东的碳排放主要来源于以煤炭为主的能源结构、高耗能的第二产业和“偏重”的工业结构[42]。因此在优化产业结构的同时重点促进工业转型升级，并逐渐改变煤炭在能源结构中占据主导地位的现状成为山东及其类似省份实现达峰目标的重点。首先，应促进产业优化升级，调整产业结构。第二产业是山东等沿海地区产业结构的主要产业，重工业又是山东省第二产业的主要部门。对重工业领域进行资源整合，是从源头上降低山东碳排放的主要手段，必须将工业由能源密集型转化为技术密集型，从经济发展模式上进行根本性改变。其次，转变以煤为主的能源结构，从源头上改变能源供应格局，降低碳强度，并积极发展太阳能，风能等清洁能源[41]。最后，应该提高技术效率，降低能源损耗，在电力运输过程中能源损失占能源损失总量的绝大部分，因此，改革电网，加速电网升级也是非常必要的，通过以上对策，山东可在 2024 年实现碳排放达峰(如图 1)。总体上东部沿海发达省份，应通过积极发展并利用清洁能源为手段降低碳排放，并转变工业的粗放型发展方式，转向集约型。

江西省属于中部地区的典型代表。虽然江西省的碳排在六省中增速相对缓慢，但是江西省碳排放达峰的目标实现不容乐观。情景分析研究发现，江西省实现 2030 年左右碳排放达峰(如图 1)的条件包括：政府及民众均不断提高节能意识，加大清洁能源的发展力度，在一定程度上优化产业结构及能源结构，提高非化石能源占比，并且企业能够提高自主创新水平；届时，江西省碳排放将达峰，峰值约为 0.8 亿吨[3] (如图 1)。中部六省区资源相对比较丰富，这主要因为山西、河南的煤炭资源丰富，但是江西省资源禀赋略差，总体呈现缺煤、无油、少气的特征，再加上历史条件，使得江西省的产业结构主要以钢铁、水泥等高能耗产业为主，并且，能源结构以煤炭为主[43]。因此从政策上看，江西省在短期内可以以天然气等含碳低的化石能源作为中继能源，同时提高煤炭的利用效率。但长远来看必须加大对清洁能源的发展力度，并且产业结构的优化对其十分重要，尽早摆脱高能耗、高排放粗放式发展方式，转向资源集约型、环境友好型的经济发展方式。另外，研究发现，江西省为中部六省中森林碳汇量最大的省份，其次

为湖南,河南最小[44]。各省份应适度加大森林面积,积极增加碳汇,可以在一定程度上降低净碳排放量,增加碳排放权。

从区域对比的角度看,如图1所示,以甘肃为代表的西部地区相对东部地区仍处于起始阶段,碳排放还要经历高速增加,才能实现达峰,而以江西和山东为代表的东部地区距离碳排放峰值的目标已较为接近,在经历缓慢增加后即可实现碳排放达峰,总体而言,中西部地区碳排放峰值实现时间将整体晚于东部地区,但也可在2030年左右实现碳排放达峰。

3. 结语

通过上述梳理和分析,可以发现用于碳排放达峰研究的模型多种多样,繁简不一;基于模型模拟的情景分析研究基本认为中国在2030年顺利实现碳排放达峰具有较大可能性,但这必须以恰当的政策支持,其中包括调整产业结构、能源结构,转变发展模式,推广清洁能源,以及积极增强碳汇能力;具体到各省(市)而言,应在国家整体部署下,积极“因地制宜”的制定达峰时间、路径和水平,在恰当政策的支持下均能于2030年左右实现碳排放达峰。

目前中国正处于经济快速发展时期,虽然整体呈现后工业化时期,但是局部地区仍然处于工业化中期,顺利实现碳排放目标,能源结构的调整至关重要,必须提高能源结构调整的速度,坚定不移的改变煤炭处于国家能源利用之首的现状,在短期内可以通过发展天然气等碳强度相对较低的能源,但在长远目标来看,必须实施能源创新,大力发展清洁能源,建立清洁能源经济体,积极扭转因煤炭产能过剩而导致的清洁能源发展受限的局面,这样才能真正实现经济发展与高碳能源消耗的脱钩。

同时,下面三点需给予重视:1)当前研究较多的使用统计模型,其参数一般是基于历史数据分析得到的,是否适用于未来社会经济情景,尚未受到应有的关注,因而由此给研究结果带来的不确定性尚待评估;2)目前所采用的模型多数是由国外科学家原创的,虽然后期经过中国本土科学家的本土化改造,但是其核心过程及其数学表达,需要给予充分评估;3)基于模型的情景分析中对地缘环境变化带来的不确定性关注不够,建议在后续研究中,在设置情景时,将地缘环境演变作为情景之一。

基金项目

国家重点研发计划项目(2016YFA0602800; 2016YFA0602704);中国科学院地理科学与资源研究所可桢杰出青年学者计划(2015RC101);中国科学院青年创新促进会会员项目(2015038)。

参考文献 (References)

- [1] 王少剑,刘艳艳,方创琳. 能源消费 CO₂ 排放研究综述[J]. 地理科学进展, 2015, 34(2): 151-164.
- [2] 孙维,余卓君,廖翠萍. 广州市碳排放达峰分析[J]. 新能源进展, 2016, 4(3): 246-252.
- [3] 席细平,谢运生,王贺礼,等. 基于 IPAT 模型的江西省碳排放峰值预测研究[J]. 江西科学, 2014, 32(6): 768-772.
- [4] Ehrlich, P.R. and Holdren, J.P. (1971) The Impact of Population Growth. *Science*, **171**, 1212-1217. <https://doi.org/10.1126/science.171.3977.1212>
- [5] Waggoner, P.E. and Ausubel, J.H. (2002) A Framework for Sustainability Science: A Renovated IPAT Identity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **99**, 7860-7865. <https://doi.org/10.1073/pnas.122235999>
- [6] York, R., Rosa, E.A. and Dietz, T. (2003) STIRPAT, IPAT and ImpACT: Analytic Tools for Unpacking the Driving Forces of Environmental Impacts. *Ecological Economics*, **46**, 351-365. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00188-5)
- [7] 渠慎宁,郭朝先. 基于 STIRPAT 模型的中国碳排放峰值预测研究[J]. 中国人口资源与环境, 2010, 20(12): 10-15.
- [8] 马宏伟,刘思峰,赵月霞,马开平,袁潮清. 基于 STIRPAT 模型的我国人均二氧化碳排放影响因素分析[J]. 数理统计与管理, 2015, 34(2): 243-253.

- [9] Wang, K., Wang, C., Lu, X. and Chen, J. (2007) Scenario Analysis on CO₂ Emissions Reduction Potential in China's Iron and Steel Industry. *Energy Policy*, **35**, 6445-6456. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.08.007>
- [10] Huang, Y., Bor, Y.J. and Peng, C.Y. (2011) The Long-Term Forecast of Taiwan's Energy Supply and Demand: LEAP Model Application. *Energy Policy*, **39**, 6790-6803. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.023>
- [11] Tao, Z., Zhao, L. and Zhao, C. (2011) Research on the Prospects of Low-Carbon Economic Development in China Based on LEAP Model. *Energy Procedia*, **5**, 695-699. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.123>
- [12] 高虎, 梁志鹏, 庄幸. LEAP 模型在可再生能源规划中的应用[J]. 中国能源, 2004, 26(10): 34-37.
- [13] 常征, 潘克西. 基于 LEAP 模型的上海长期能源消耗及碳排放分析[J]. 当代财经, 2014(1): 98-106.
- [14] 龙妍, 丰文先, 王兴辉. 基于 LEAP 模型的湖北省能源消耗及碳排放分析[J]. 电力科学与工程, 2016(5): 1-6.
- [15] 何旭波. 补贴政策与排放限制下陕西可再生能源发展预测——基于 MARKAL 模型的情景分析[J]. 暨南学报, 2013(12): 1-8.
- [16] 陈文颖, 吴宗鑫. 用 MARKAL 模型研究中国未来可持续能源发展战略[J]. 清华大学学报, 2001, 41(12): 103-106.
- [17] Chen, C., Green, C. and Wu, C. (2002) Application of MARKAL Model to Energy Switch and Pollutant Emission in Shanghai. *Shanghai Environmental Sciences*, **21**, 515-519.
- [18] 陈文颖, 高鹏飞, 何建坤. 用 MARKAL-MACRO 模型研究碳减排对中国能源系统的影响[J]. 清华大学学报, 2004, 44(3): 342-346.
- [19] 毕超. 中国能源 CO₂ 排放峰值方案及政策建议[J]. 中国人口资源与环境, 2015(5): 20-27.
- [20] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国 2050 年低碳情景和低碳发展之路[J]. 中外能源, 2009, 14(6): 1-7.
- [21] 姜克隽, 贺晨旻, 庄幸, 等. 我国能源活动 CO₂ 排放在 2020-2022 年之间达到峰值情景和可行性研究[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(3): 167-171.
- [22] 柴麒敏, 张希良. 实现 40%-45% 目标的途径和政策思考[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2010: 201-212.
- [23] 柴麒敏, 徐华清. 基于 IAMC 模型的中国碳排放峰值目标实现路径研究[J]. 中国人口资源与环境, 2015, 25(6): 37-46.
- [24] 郑海涛, 胡杰, 王文涛. 中国地级城市碳减排目标实现时间测算[J]. 中国人口资源与环境, 2016, 26(4): 48-54.
- [25] 林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. 管理世界, 2009(4): 27-36.
- [26] 何建坤. 中国的能源发展与应对气候变化[J]. 中国人口资源与环境, 2011, 21(10): 40-48.
- [27] 何建坤. CO₂ 排放峰值分析: 中国的减排目标与对策[J]. 中国人口资源与环境, 2013, 23(12): 1-9.
- [28] 杜强, 陈乔, 陆宁. 基于改进 IPAT 模型的中国未来碳排放预测[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2294-2302.
- [29] 周伟, 米红. 中国能源消费排放的 CO₂ 测算[J]. 中国环境科学, 2010, 30(8): 1142-1148.
- [30] 王铮, 朱永彬, 刘昌新, 马晓哲. 最优增长路径下的中国碳排放估计[J]. 地理学报, 2010, 5(12): 1559-1568.
- [31] 朱永彬. 排放控制目标下我国最优经济增长路径, 减排路径与碳排放路径与碳排放趋势研究及模拟系统开发[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [32] 国家统计局. 中国统计摘要[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [33] 柴麒敏. 分解中国碳排放峰值[J]. 中国经济报告, 2015(7): 54-56.
- [34] 周大地. 十三五及中长期能源发展战略问题[J]. 开放导报, 2016(3): 7-12.
- [35] 林毅夫. 解读中国经济[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [36] 冯宗宪, 王安静. 中国区域碳峰值测度的思考和研究——基于全国和陕西省数据的分析[J]. 西安交通大学学报, 2016, 36(4): 96-104.
- [37] 郭志玲. 甘肃省碳排放峰值预测与应对策略研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [38] 张广裕. 甘肃省碳排放影响因素分析与低碳发展研究[J]. 河北科技大学学报, 2013, 13(4): 1-9.
- [39] 余建刚. 甘肃省经济增长, 能源消费与碳排放的关系研究[J]. 企业技术开发, 2015, 34(3): 115-118.
- [40] 石红莲, 赵越. 甘肃低碳经济发展的路径探索[J]. 中国商论, 2016(15): 120-121.
- [41] 傅增清. 山东温室气体排放趋势与减排路径研究[J]. 山东财政学院学报, 2012(5): 72-78.
- [42] 栾绍朔. 山东省碳排放预测及其减排路径分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [43] 杨锦琦. 江西能源消费, 碳排放与低碳经济发展研究[J]. 企业经济, 2014(10): 36-39.
- [44] 黄蕊, 王铮, 刘慧雅, 等. 中国中部六省的碳排放趋势研究[J]. 经济地理, 2012, 32(7): 12-17.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：gser@hanspub.org