

2050年中国能源消费结构的系统动力学模拟 ——基于重点行业的转型情景

何 则^{1,2,3,4}, 周彦楠^{1,2,3}, 刘 毅^{1,2,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 区域可持续发展分析与模拟实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 粤港澳大湾区战略研究院, 广州 510070;

4. 乌特勒支大学人文地理与空间规划系, 荷兰 乌特勒支 3584CB)

摘要: 面向2050年世界能源发展形势与中国发展实际, 推进能源转型与保障油气供给是关乎国家发展和能源安全的重大前瞻性课题。考虑能源转型这一关键前提, 基于重点行业部门的政策情景模拟了中国能源消费的总量与结构变化情况, 并分析了中国油气消费需求及其对外依存情况。结果显示: (1) 若实行积极的部门能源转型政策, 中国的一次能源消费总量将在较大幅度上低于参照情景, 并有望在2040年达到峰值, 其峰值在5755~7000 mtce之间。具体来看, 煤炭消费可在2030年前达峰, 石油消费在两种转型情景下均将在2040年达到峰值, 而天然气仅在加速转型情景下可于2035年实现消费达峰。(2) 从推进能源结构转型角度看, 在转型情景下中国2050年煤炭消费量占能源消费总量的比例为21%, 在加速转型情景下到2050年煤炭占能源消费总量的比例将不足10%; 无论是在转型情景下还是加速转型情景下, 到2050年油气消费占中国能源消费总量的30%; 若推行更加积极的转型政策, 在加速转型情景下中国到2050年非化石能源消费占比将超越化石能源。(3) 高需求低产出将导致中国油气对外依存度在中长期内处于较高水平, 因而, 在2050年前保障国家能源安全仍不可忽视油气供给稳定性。研究可为中国能源安全战略与能源政策制定提供科学依据。

关键词: 能源消费; 能源结构; 能源转型; 能源安全; 情景模拟; 2050; 中国

近年来, 在全球气候变暖与“巴黎协定”国家自主减少碳排放承诺的压力下, 国际社会高度关注并致力于推进世界能源的清洁转型。综合国际能源署(IEA)、石油输出国组织(OPEC)、埃克森美孚、英国石油(BP)、壳牌、中国石油(CNPC)和美国能源信息署(EIA)等多家国际主流机构对世界能源发展的形势预测^[1], 2050年前世界煤炭与石油消费将依次达峰, 非化石能源比例将在较大程度上有所提升。从不同能源的消费总量达峰时间来看, 2020—2030年间煤炭消费量将到达峰值, 2030—2040年间石油消费将到达峰值, 2030—2050年间天然气的重要性仍将进一步提升并成为增速最快的化石能源。从现在起到2050年, 这是中国实现两个“百年梦”和建设“美丽中国”的关键时期, 也是实现能源革命的战略机遇期^[2]。此外, 考虑到我国“多煤少油少气”的能源资源禀赋, 在这一关键机遇期内, 若通过能源转型缓解乃至解决中国的能源短缺问题^[3,4], 则可对中长期发展提供强有力的能源动力保障。然而, 基于世界能源的中长期发展形势与中

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41842056, 41871118, 42022007); 国家留学基金项目(201904910633)

作者简介: 何则(1992-), 男, 陕西宝鸡人, 博士研究生, 主要从事能源经济地理, 产业与区域规划研究。

E-mail: heze@lzb.ac.cn

通讯作者: 刘毅(1957-), 男, 北京人, 研究员, 博士生导师, 主要从事人文地理学与区域可持续发展研究。

E-mail: liuy@igsnr.ac.cn

国发展实际，中国应采取什么策略推进能源转型？能源转型所带来的能源消费总量与结构的变化，又要求中国如何调整能源安全战略与相关政策呢？这是事关我国经济社会发展与能源安全的重大前瞻性课题。

针对这一关键问题，诸多机构与专家早在十年前业已开始探索。但是，由于各项研究所采用的数据、方法与对比基期等不同，既有研究对于中国能源消费总量是否能够达峰以及何时达峰，抑或持续增长，其判断存在较大差异。一种观点认为，中国能源消费总量将在2050年前达峰，如国家发展和改革委员会能源研究所姜克隽等^[5]基于IPAC模型和情景分析，认为与2005年相比中国2050年可能增加1.9倍；能源所课题组^[6]在早期的研究中曾预测，中国将在2040年迎来能源消费的“零增长”，届时能源需求总量约为3550 mtce。持同样观点的还有中国社会科学院数量经济与技术经济研究所课题组，他们的研究显示，尽管中国的初级能源消费量将持续增长，但在2040年左右接近平缓^[7]。最近，中国石油技术经济研究院《2050年世界与中国能源展望》^[8]展望也提出，一次能源消费增速逐步放缓并将于2040年前后进入峰值平台期。与之不同，中国科学院地理科学与资源研究所樊杰等^[9]则认为中国未来能源消费的增长必将是长期的、持续的，仅仅从生产角度来考虑中国未来能源消费以及碳排放空间并得出中国在2035—2040年达到碳排放高峰的乐观结论实际上是偏颇的；沈镭等^[10]参考主要发达国家能耗变化规律对中国未来能源消费趋势的定量预测分析，认为中国能源消费总量还将持续增长，2050年的能源消费总量在6191~12133 mtce。第三类观点认为，中国能源总需求的峰值已经到来。如刘强等^[11]则提出，伴随着人口向城镇聚集和工业化进程的基本结束，中国能源总需求的峰值已经到来，未来能源需求的增长点在于高端制造业和生活消费；2050年中国能源需求总量将下降到3000 mtce，并基本稳定下来。另外，上述研究对于中国不同类型能源的消费达峰时间尚未给出较为明确且一致的判断结果。而考虑到我国能源禀赋的独特性与外部环境的复杂性，中长期来看，油气资源在国家能源结构中的比例变化尤需重点关注。

鉴于此，本文在综合考虑世界能源中长期走势与中国能源发展现实特征的基础上，基于重点行业部门采用不同的政策情景，模拟中国未来30年能源消费总量达峰及结构变化情况；并以此结果为依据，进行中国油气资源的对外依存情况分析。研究可为中国中长期能源安全战略与政策制定提供科学依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 模型与数据

本文采用的模型为国家应对气候变化战略研究和国际合作中心（NCSC）、国家发展和改革委员会能源研究所（ERI）及美国能源创新（EI）联合研发的“能源政策模拟模型”（EPS模型）。EPS模型是基于Vensim语言开发的一款大型开源系统动力学模型，构成模型的代码超10000行，其中定义的变量超过1300个。采用EPS模型可识别并评估气候、能源和环境政策对各类指标的综合影响，为促进能源转型提供政策方案设计的依据，具体可参考姜克隽等^[12]和刘强等^[13]的相关研究。本文使用的EPS模型为2019年10月7号最新发布的2.0.0版本。EPS模型包含了能源需求模块、能源转换模块、碳捕获和封存、燃料模块、研发模块、土地利用模块、排放模块和现金流模块。其中，能源需求模块由工业、建筑和交通三个终端部门组成。需要说明的是，EPS模型中的工业部门不仅包含一般统计口径的工业，还包含农业；建筑部门包括商业建筑和居民建筑；交通部门

包含营运交通和私人交通。能源转换主要分为电力生产和供热两个部分。基于以上处理, EPS模型在能源需求和能源转换两个模块内包括电力生产、供热、工业、交通、建筑共5个子模块。进而, EPS模型通过建立一系列方程式和内部参数模拟, 可追踪与描述中国能源系统的能源流动及现金流动等动态行为及因果反馈(图1)。驱动EPS模型的所有数据来源于中国官方数据, 包括国家气候战略中心所做的情景研究数据^[14]、《中国能源统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国能源发展“十三五”规划》以及其他中国官方出台的能源类相关规划等。由于开发者已将驱动模型的初始数据更新到2016年, 所以EPS模型基准年为2016年, 规划期为2050年, 模拟时间步长为1年。

1.2 情景与参数

基于世界能源的中长期发展形势与中国发展实际, 中国应采取不同策略推进能源转型进程中, 能源消费的总量与结构将如何变化? 在这一事关中国经济社会发展与能源安全的重大前瞻性问题上, 显然在各方面均存在较大的不确定性。在不确定性条件下, 基于情景分析的模拟预测则显得尤为重要^[15]。为此, 研究设定了三个不同的情景, 以模拟不同能源转型政策情况下, 中国到2050年能源消费的总量、结构及其变化情况。由于重点行业部门是推动全国能源转型的主要政策抓手^[16], 因而本文主要从交通、建筑、电力、工业和供热等主要部门视角设定不同情景参数(表1)。参数的选取主要借鉴并参考EPS模型推荐参数与国家气候战略中心^[13]、刘强等^[13,16]、姜克隽等^[12,17]以及国际能源署的相关报告等。

(1) 参照情景, 是对当前政策延续性执行的结果模拟, 是转型情景比较的基准。以现有政策执行力度, “十三五”时期实施能源消费总量控制目标和能源强度的双控目标, GDP能源强度将下降15%, 非化石能源占一次能源消费比例达15%。“十三五”后, 将以巴黎协定的国家自主减排目标为基础, 2030年非化石能源比例达20%。2030年之后继续执行延伸政策。

(2) 转型情景与加速转型情景。这两个情景设计的总思路均是促进能源利用的清洁化转型及提高能源利用效率, 而实现这一目标则依赖于各部门的政策选择与执行力度。因此, 加速转型情景相对于转型情景的差异主要在于电力、工业和供热等部门采取了更为激进的转型政策。另外, 姜克隽^[17]的最新研究指出, 中国实现能源转型或可不依赖于碳税等政策。因此本文在转型情景设计中未考虑碳价与碳税政策。

2 结果分析

2.1 一次能源消费总量变化分析

在参照情景下, 中国将按照现有消费模式与政策执行力度进行重点行业的生产用能。一次能源总消费量将由2016年的4692 mtce增加到2030年的6947 mtce; 到2050年

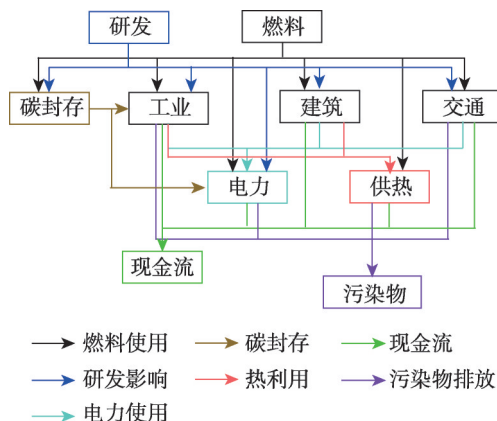


图1 能源政策模拟模型框架^[11]

Fig. 1 Framework of energy policy simulation

表1 情景定义及参数选择

Table 1 Scenario definitions and parameters

部门	转型情景	加速转型情景
交通	<ul style="list-style-type: none"> ● 加快推进交通去油化，提高电动汽车市场化水平。到2050年，轿车和SUV占比达到7%，公交车占20%，卡车占20%，电驱动铁路客运与货运的年替代率6%，电动摩托车年替代率5% ● 持续提高燃料经济性。到2050年轿车和SUV的燃油经济性提升30%，重型车辆提升24%，飞机提升27%，货运列车提升31%，船舶提升33%，摩托车提高247% 	
建筑	<ul style="list-style-type: none"> ● 提升建筑电气化程度。到2050年，城市建筑电气化程度提升到35%，乡村建筑提升到38%，商业建筑提升到49% ● 加大建筑节能改造，推广更严格的能效标准。城乡住宅及商业建筑制热效率提升40%，城乡住宅及商业建筑制冷效率提升50%，城乡住宅照明效率提升26%，商业建筑提升15%，城乡住宅及商业建筑围护结构提升效率40%，城乡住宅及商业建筑的其他改造与提升措施13% 	
电力	<ul style="list-style-type: none"> ● 加大落后燃煤机组的淘汰力度。每年至少退出30000 MW/年 ● 强化非水可再生电力发展。到2050年通过可再生能源配额制政策使非水可再生能源发电量占比至少达到31.0% ● 推动电网储能技术的发展。在基准情景上保守估计每年2%的增长率 ● 新能源补贴。依照原有标准执行 [风电补贴60元(MW·h)，光伏发电补贴为200元(MW·h)] 	<ul style="list-style-type: none"> ● 禁止新建燃煤电厂 ● 加大落后燃煤机组的淘汰力度。每年至少退出30000 MW/年 ● 强化非水可再生电力发展。到2050年通过可再生能源配额制政策使非水可再生发电量占比至少达到39.0% ● 推动电网储能技术的发展。在基准情景上保守估计每年5%的增长率 ● 新能源补贴退坡。可再生电力已初步具备市场竞争力，因此取消可再生电力的补贴政策
工业	<ul style="list-style-type: none"> ● 加快低效工业设备改造与折旧。到2050年实现低效工业设备改造与折旧的比率至少过半 ● 提高工业能效标准。各行业平均提升18% ● 工业生产中的煤改气。12%的工业用煤改为天然气 ● 改善工业系统的整体设计。通过优化系统设计效能提升50% 	<ul style="list-style-type: none"> ● 加快低效工业设备折旧。到2050年彻底实现低效工业设备的改造与折旧 ● 提高工业能效标准。水泥26%，油气行业31%，钢铁38%，化学35%，采矿31%，其他工业50% ● 工业生产中的煤改气。25%的工业用煤改为天然气 ● 改善工业系统的整体设计。通过优化系统设计效能翻倍
供热	<ul style="list-style-type: none"> ● 提升热电联产占比。到2050年实现50% ● 持续降低燃煤供热占比。到2050年天然气供热比例在基准情景上再减少25% 	<ul style="list-style-type: none"> ● 提升热电联产占比。到2050年实现67.5% ● 持续降低燃煤供热占比。到2050年天然气供热比例在基准情景上再减少50%

一次能源消费总量将达到 7965 mtce，与2016年相比将增长 69.75%。与之相比，在转型情景下，2050年中国一次能源消费总量达到 6788 mtce；同时，在转型情景下中国一次能源消费在 2040 年便有望到达峰值，其峰值为 7000 mtce，相当于 2016 年 1.5 倍。与转型情景相比，加速转型情景下中国一次能源消费总量在 2030 年将达到 6117 mtce，之后中国一次能源消费将呈现十分缓慢的增长趋势；到 2040 年能源消费峰值为 6265 mtce，相当于 2016 年的 1.34 倍。此后中国一次能源消费总量将逐渐降低，到 2050 年将降至 5755 mtce，相比于 2016 年增长了 22.66%（图 2）。

2.2 分类能源消费量及结构分析

(1) 煤炭。煤炭作为当前中国一次能源消费的主体，2016 年的消费量为 3685 mtce，

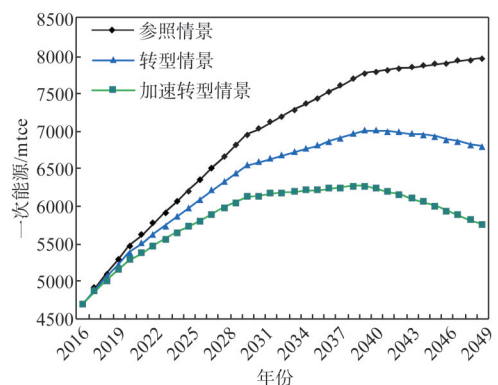


图 2 三种情景下中国一次能源消费总量变化
Fig. 2 Changes of China's total value of primary energy consumption under three scenarios

占比高达66%。从一次能源消费结构的转变来看(图3),在参照情景下,2030年之前煤炭仍然是中国最主要的能源并将持续增加。峰值平台期出现在2030年前后,在2030年达到峰值时煤炭的消费量为3484 mtce;到2045年左右煤炭的消费量将重新回落到基期水平,到2050年煤炭的消费量将逐渐降至2804 mtce。在转型情景下,煤炭消费峰值的到来时间将大大提前,到2021年煤炭消费就将迎来3090 mtce的峰值,此后煤炭消费量将加速减少,到2030年煤炭消费量降为2873 mtce,2050年煤炭消费量将仅为1411 mtce,相当于2016年的38.29%。在加速转型情景下,由于不再新建煤电装置,煤炭的消费量在模拟基期的第二年便开始减少,到2035年左右将降至1000 mtce左右,而到2050年将仅剩500 mtce左右,届时煤炭占能源消费总量的比例将不足10%(图4)。

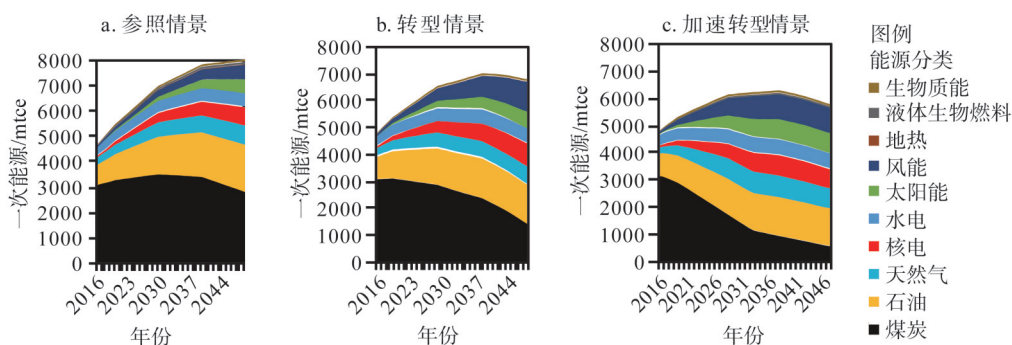


图3 三种情景下中国分类一次能源消费量变化

Fig. 3 Changes of different types of China's primary energy consumption under three scenarios

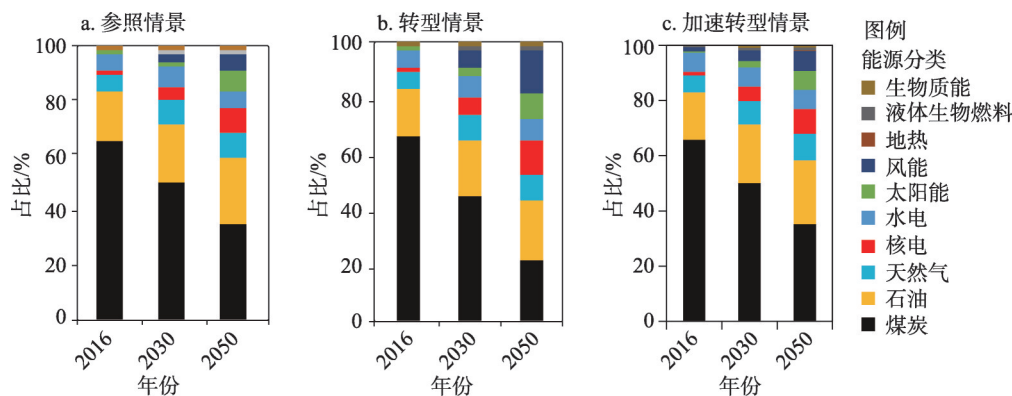


图4 三种情景下中国一次能源消费结构变化

Fig. 4 Changes in the structure of China's primary energy consumption under three scenarios

(2) 石油和天然气。从石油消费量转变来看(图3、图4),参照情景下石油和天然气消费将持续增长,分别从2016年的806 mtce和292 mtce增长至2050年的1845 mtce和769 mtce。在两种转型情景下,石油消费均将在2040年达到峰值,其峰值分别为1482 mtce和1444 mtce;从比例来看,到2050年石油消费仍占一次能源消费的20%以上。与石油相比,由于在转型和加速转型情景下推行了不同的转型政策,天然气的增长速度在转型情景和加速转型情景下呈现出不同的转型特征。在转型情景下天然气消费将

持续增长, 到2050年其消费量将增至658 mtce。而在加速转型情景下, 由于实行了工业生产中的煤改气等政策, 短期内天然气将快速增加, 进而导致天然气消费将在2035年达峰, 峰值为827 mtce; 到2050年其消费量为752 mtce。综合油气来看, 无论是在转型情景下还是加速转型情景下, 油气消费量均将在2016年的基础上增长1倍左右, 到2050年需求量在2100 mtce以上, 占中国能源消费总量的30%。

(3) 非化石能源。参照情景下, 非化石能源占能源消费比例将逐渐增长, 到2050年将占中国一次能源比例的32% (图3、图4)。其中, 核电在2041年达到546 mtce的同时将超越水电成为中国第四大能源, 占比为9%。在两种转型情景下, 核电超越水电的年份将分别提前至2035年之前; 加速转型情景下到2025年核电占能源消费总量的比例将达到12%。水电的发展在三种情景下均表现出相近的趋势, 在加速转型情景下其消费总量将从325 mtce增至2050年的557 mtce, 占比为10%。太阳能和风能的消费量在三种情景下均持续增长, 且风能增长幅度总体大于太阳能。从占比和增速变化来看, 太阳能和风能在转型情景下将分别由2016年的19 mtce和73 mtce增长至2050年的632 mtce和1086 mtce, 占比分别为9%和16%; 而在加速转型情景中, 太阳能和风能的总体增长态势将在2035年出现一个瓶颈, 之后增速逐步趋缓; 到2050年太阳能和风能消费量将分别为733 mtce和936 mtce, 占比分别达到13%和16%。地热、液体生物燃料和生物质能等其他能源中在三种情景中均有一定的增长, 但发展缓慢, 占能源消费总量的比例在2%左右。整体来看, 若推行积极的转型政策, 在加速转型情景下, 中国一次能源消费结构将呈现出更快的清洁与低碳化转型特征, 到2050年非化石能源占比将超越化石能源, 达到53%。

2.3 油气资源对外依存情况分析

尽管从模拟结果来看, 煤炭目前是中国能源消费的主体, 且在参照情景下, 2030年之前煤炭的比例仍将持续增加。然而, 由于我国的资源禀赋为“多煤少油少气”, 长期以来油气供应不足才是中国能源安全的短板^[18-20]。从中国能源进口的外部环境来看, 油气资源的进口环境远比煤炭复杂, 面临着油气进口来源高度集中且以高地缘政治风险国家为主, 海外能源市场面临着亚洲发达国家与新兴油气消费大国的激烈竞争, 油气运输战略通道风险节点众多且易被域外势力实施军事牵制, 石油战略储备不足从而难以抵抗突发战争和禁运风险, 部分油气来源国持续稳定供应的前景堪忧等一系列风险^[21-24]。而其他种类能源尚不存在明显的对外依存问题, 面临的地缘政治风险较小。所以, 油气资源稳定供给将仍是未来相当一段时间内的重点, 其对外依存情况仍将是我国能源安全战略的核心所在。基于这些考虑, 重点针对油气资源的消费转变, 结合油气消费量的模拟结果与不同的来源油气产量数据, 研判2050年前中国的油气资源对外依存情况。

由于不同机构对中国油气产量的判断存在较大的差异, 因此不可避免将对对中国油气对外依存度的预估产生较大影响。为了降低由于产量预测导致的中国油气对外依存度预估的不确定性, 将DNV·GL^[25]与中国石油技术经济研究院^[6]提供的中国油气产量的长时间序列集进行对比研究 (图5、图6)。根据DNV·GL^[25]产量预测数据, 2030年之前中国石油年产量可保持在177~300 mtce之间, 但此后将逐渐减少。天然气产量在近期实现增长, 产量将达到200 mtce, 之后又将出现下降态势, 2030年产量将在142 mtce左右, 之后产量仍将下降。据此, 在参照情景下到2030年中国石油对外依存度将高达85%; 在转

型情景和加速转情景下石油对外依存度依然高达84%，到2050年将超过90%。天然气在参照情景与转型情景下，对外依存度在2022年之前将呈现快速升高的特征，2022年对外依存度将超过70%；而在加速转型情景下，由于大力推进了煤改气等政策导致到2022年中国的天然气对外依存度将高达76%。2022年后，中国天然气对外依存度上升速度将大为减缓，但到2050年中国95%的天然气将可能依赖于进口。根据中国石油技术经济研究院报道，包含传统陆上油气、离岸生产以及非常规油气在内，中国原油产量在2030年前维持在280 mtce水平，之后会逐步下滑；天然气产量在2040年前将较快增长，到2050年产量将稳定在450 mtce左右。由此，根据中国石油技术经济研究院产量数据，到2050年中国石油对外依存度在80%~85%；天然气在加速转型情景下，2035年峰值期的对外依

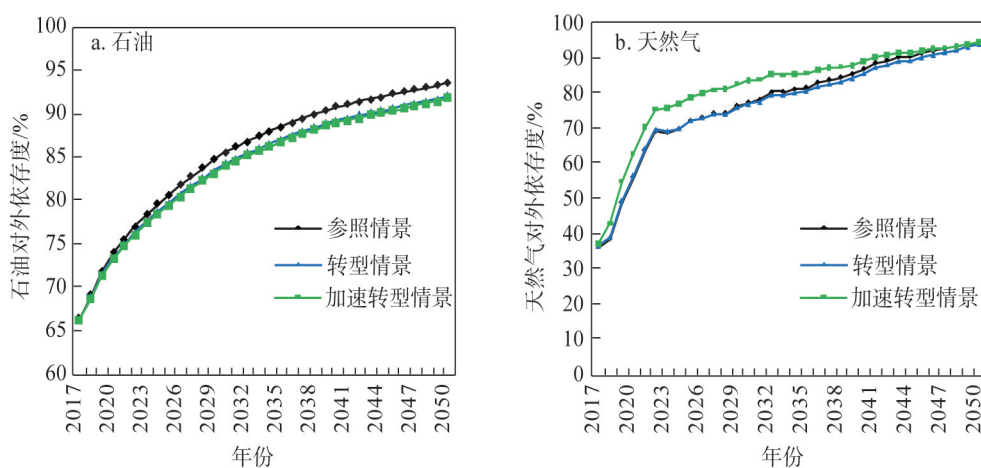


图5 三种情景下中国油气对外依存度变化 (基于DNV · GL^[25]关于中国油气的产量预估)

Fig. 5 Changes of China's overseas dependence in oil and gas sections under three scenarios (based on production prediction from DNV · GL^[25])

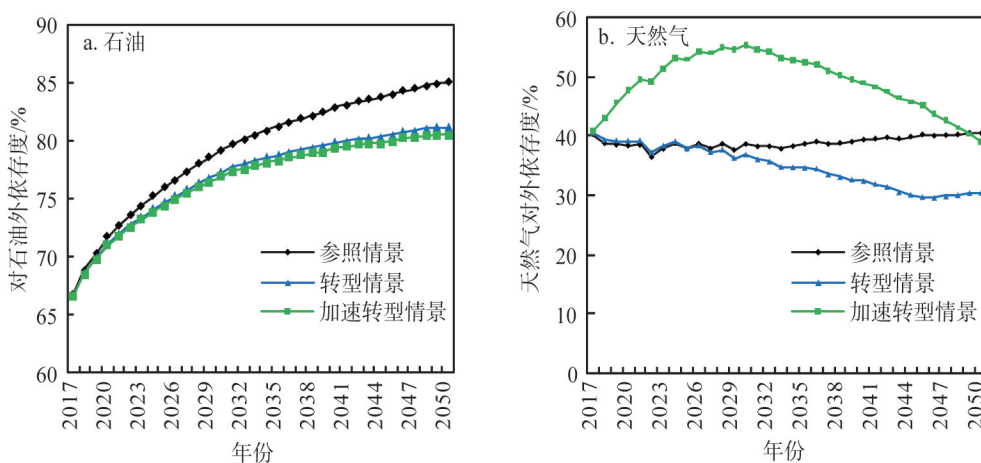


图6 三种情景下中国油气对外依存度变化 (基于中国石油技术经济研究院^[8]关于中国油气的产量预估)

Fig. 6 Changes of China's overseas dependence in oil and gas sections under three scenarios (based on production prediction from China's Institute of Petroleum Technology and Economics^[8])

存度为55%，到2050年的对外依存度接近40%。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文采用EPS模型并基于重点行业部门的政策情景，模拟研究了三种不同情景下中国到2050年的能源消费与油气对外依存度问题。研究的主要结论有：

(1) 面向2050年，若实行积极的部门能源转型政策，中国的一次能源消费总量将在较大幅度上低于参照情景，能源消费总量有望在2040年达到峰值，其峰值在5755~7000 mtce之间。三种情景下煤炭消费总量均有可能在2030年前达峰，在两种转型情景下石油消费均将在2040年达到峰值；天然气消费仅在加速转型情景下可能于2035年达峰。这与世界总体发展形势基本一致。

(2) 从推进能源结构转型方面看，在转型情景下中国2050年煤炭消费量将相当于2016年的38.29%，占能源消费总量的比例为21%；在加速转型情景下，到2050年煤炭消费占能源消费总量的比例将不足10%。综合油气来看，无论是在转型情景下还是加速转型情景下，油气消费量均将在当前的基础上增长近1倍左右，到2050年需求量在2100 mtce以上，占中国能源消费总量的30%，其对中国能源安全的重要影响依然不可忽视。若推行更加积极的转型政策，在加速转型情景下，中国到2050年非化石能源占比将超越化石能源，达到53%。

(3) 高需求低产出将导致中国油气对外依存度在未来20年内仍处于较高水平。根据DNV·GL^[25]对中国油气产量的判断，三种情景下到2030年中国的石油的对外依存度将在85%左右，到2050年将超过90%；到2050年中国95%的天然气将可能依赖于进口。根据中国石油技术经济研究院对中国油气产量预判，到2050年中国石油对外依存度在80%~85%；天然气在加速转型情景下，2030年峰值期的对外依存度为55%，到2050年的对外依存度接近40%。

3.2 讨论

中国石油技术经济研究院《2050年世界与中国能源展望（2019）》展望提出，一次能源消费增速逐步放缓并将于2040年前后进入峰值平台期；在基准情景下，一次能源需求在2035—2040年进入峰值平台期，峰值为5700 mtce左右。本文通过基于重点行业部门的系统动力学模拟研究认为，中长期来看中国能源消费总量有望在2040年达到峰值，其峰值在5755~7000 mtce。通过比较可知，无论是达峰时间，还是达峰时的能源消费总量，这一认识均与中国石油技术经济研究院的判断基本一致。从达峰时间来看，本文结果与国家发展和改革委员会能源所和社会科学院课题组具有较好的一致性。而从达峰时的能源消费总量来看，本文结果与中国科学院地理科学与资源研究所的沈镭研究员的判断较为接近，这表明EPS模型用于能源消费模拟时其结果具有较高的可信度。

第二，高需求低产出将导致中国油气对外依存度在未来20~30年仍处于较高水平，因而若以油气需求保障与供给稳定性为国家能源安全的基本目标，那么在2050年前仍需要重点关注油气资源的海外稳定供应。综合来看，中国能源安全主要面临着地缘政治风险、海外市场的激烈竞争、运输通道风险、战略储备不足、部分油气来源国供应的前景

堪忧等一系列风险。因而,中国油气供给稳定性问题的解决之道,需要市场、外交、军事、经济和产业等方面的一揽子政策和措施^[26,27],需要以资源国际化为目标实施“走出去”战略,通过多种渠道全力开拓国际石油资源,并重点加强与俄罗斯和中亚的能源合作^[28,29],推进中东、非洲、中南美洲等重点地区的能源外交^[30,31]以及建立并完善国家战略石油储备体系^[32]。考虑到目前全球石油市场整体处于供过于求的低油价时代、世界石油消费重心的东亚转移以及供给重心的西移,中国石油供给的综合风险仍然可控。

第三,尽管中国油气在中长期仍将高度依赖于海外供给,但情景模拟的结果显示,在两种转型情景下石油消费均将在2040年达到峰值,天然气消费在加速转型情景下也可能在2035年达峰。2008年金融危机以来,中国加快了海外油气资产的并购步伐。尤其2013年“一带一路”倡议实施以来,中国对于“一带一路”沿线国家和地区能源相关行业的投资呈现增多趋势。接下来的20~30年,中国如果仍保持较高的海外油气资产投资,那么考虑到中国油气需求的达峰时间与油气产业的投资运营的长周期特征,如何综合平衡油气产业的投入与退出,避免石化资产在未来二三十年出现搁置问题,就成为下一阶段值得关注的问题。此外,还要关注到由于能源转型所引发的潜在能源安全问题,尤其是转型政策推动下导致的天然气需求过快增长问题。例如,由于加速转型情景中实行了工业煤改气等政策,短期内天然气将以较快的速度激增,在这种情况下不得不警惕中国“气荒”再次发生的可能性。

第四,能源体系本身具有高度的复杂性,加之当前正处于新能源与传统化石能源共存的时代。新的颠覆性能源技术的诞生也正在改变我们对能源利用方式的认知。因此,进行能源消费预测并非易事。就像在30年前的1990年,立足当时的世界能源结构和能源利用方式,鲜有专家能够预测,到2017年全球已有超过100多个城市的电力供应70%以上依靠可再生电力,其中包括奥斯陆和惠灵顿等首都城市。中国可再生电力的大规模装机也不过是十年间的事情。然而,面向未来能源发展的不确定性,针对政策优化仍然需要一些情景模拟,既需要保守估计,也需要大胆的、方向性的加速转型情景判断。总之,一方面,未来30年间的能源情景如何设计,的确是一件极富挑战的事情,即使是大型的系统动力学模型也不可能完整精细地刻画出其动态变化;另一方面,受制于能源系统的复杂性和作者对能源系统的有限认知,在情景设置与参数化方案的选择方面不可避免地存在一些疏漏。因此,如何更加科学地预测以及科学预测结果如何支撑更为精细化的政策方案制定,需要进行更长期更深入的探讨。

参考文献(References):

- [1] 曹斌,李文涛,杜国敏,等. 2030年后世界能源将走向何方?: 全球主要能源展望报告分析. 国际石油经济, 2016, 24(11): 8-15. [CAO B, LI W T, DU G M, et al. World energy trend to 2030: Analysis of major global energy outlook reports. International Petroleum Economics, 2016, 24(11): 8-15.]
- [2] 戴彦德,田智宇,朱跃中,等. 重塑能源: 面向2050年的中国能源消费和生产革命路线图. 经济研究参考, 2016, (21): 3-14. [DAI Y D, TIAN Z Y, ZHU Y Z, et al. A roadmap for China's energy consumption and production revolution by 2050. Review of Economic Research, 2016, (21): 3-14.]
- [3] 何建坤. 中国能源革命与低碳发展的战略选择. 武汉大学学报: 哲学社会科学版, 2015, 68(1): 5-12. [HE J K. The strategic choice of Chinese energy revolution and low carbon development. Wuhan University Journal: Philosophy & Social Sciences, 2015, 68(1): 5-12.]

- [4] LIU Q, CHEN Y, TIAN C, et al. Strategic deliberation on development of low- carbon energy system in China. *Advances in Climate Change Research*, 2016, 7(1-2): 26-34.
- [5] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 等. 中国2050年低碳情景和低碳发展之路. *中外能源*, 2009, 14(6): 1-6. [JIANG K J, HU X L, ZHUANG X, et al. China's low-carbon scenarios and roadmap for 2050. *Sino-global Energy*, 2009, 14(6): 1-6.]
- [6] 国家发展和改革委员会能源研究所课题组. 中国2050年低碳发展之路: 能源需求暨碳排放情景分析. 北京: 科学出版社, 2009. [Energy Research Institute National Development and Reform Commission Research Group. *China's Low Carbon Development Pathways by 2050: Scenario Analysis of Energy Demand and Carbon Emissions*. Beijing: Science Press, 2009.]
- [7] 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所课题组. 国家能源发展战略研究. 中国社会科学院, 2011. [Institute of Quantitative & Technical Economics, Chinese Academy of Social Sciences Research Group. *National energy development strategy research*. Chinese Academy of Social Sciences, 2011.]
- [8] 中国石油技术经济研究院. 2050年世界与中国能源展望. <http://etri.cnpc.com.cn/etri/qydt/201607/0d251da8cfef4c569aee255899d9a037.shtml>, 2019-12-10. [China's Institute of Petroleum Technology and Economics. *Energy outlook for the world and China in 2050*. <http://etri.cnpc.com.cn/etri/qydt/201607/0d251da8cfef4c569aee255899d9a037.shtml>, 2019-12-10.]
- [9] 樊杰, 李平星. 基于城市化的中国能源消费前景分析及对碳排放的相关思考. *地球科学进展*, 2011, 26(1): 57-65. [FAN J, LI P X. Analysis on the future energy consumption and preliminary discussion on carbon emission of China from the perspective urbanization. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1): 57-65.]
- [10] 沈镭, 刘立涛, 王礼茂, 等. 2050年中国能源消费的情景预测. *自然资源学报*, 2015, 30(3): 361-373. [SHEN L, LIU L T, WANG L M, et al. 2050 energy consumption projection for China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(3): 361-373.]
- [11] 刘强, 王怡. 中国的能源革命: 供给侧改革与结构优化(2017—2050). *国际石油经济*, 2017, 25(8): 1-14. [LIU Q, WANG Q. China's energy revolution: Reform of supply-side and structural optimization (2017-2050). *International Petroleum Economics*, 2017, 25(8): 1-14.]
- [12] 姜克隽, 胡秀莲, 刘强, 等. 中国2050年低碳发展情景研究. 见: 2050中国能源和碳排放研究课题组. 2050中国能源和碳排放报告. 北京: 科学出版社, 2009: 753-820. [JIANG K J, HU X L, LIU Q, et al. China's low carbon development pathways by 2050: Scenario analysis of energy demand and carbon emissions. In: Study Group of China Energy and Carbon Emissions. *2050 China Energy and CO₂ Emissions Report*. Beijing: Science Press, 2009: 753-820.]
- [13] 刘强, 田川, 郑晓奇, 等. 中国电力行业碳减排相关政策评价. *资源科学*, 2017, 39(12): 2368-2376. [LIU Q, TIAN C, ZHENG X Q, et al. Evaluation of CO₂ emission reduction policies in China's power sector. *Resources Science*, 2017, 39(12): 2368-2376.]
- [14] 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心, 国家发展和改革委员会能源研究所和美国能源创新. 中国气候与能源政策方案—定量分析及与“十三五”规划期的政策建议. https://china.energypolicy.solutions/docs/20160703_ExecutiveSummary_CN.PDF, 2019-11-22. [National Center for Strategic Research and International Cooperation on Climate Change, Energy Research Institute of National Development and Reform Commission and U.S. Energy Innovation. *China's climate and energy policy program-quantitative analysis and policy recommendations for the 13th five-year plan period*. https://china.energypolicy.solutions/docs/20160703_ExecutiveSummary_CN.PDF, 2019-11-22.]
- [15] 梁巧梅, 魏一鸣, 范英, 等. 中国能源需求和能源强度预测的情景分析模型及其应用. *管理学报*, 2004, 1(1): 62-67. [LIANG Q M, WEI Y M, FAN Y, et al. A scenario analysis of China's energy requirement and energy intensity: Model and its applications. *Chinese Journal of Management*, 2004, 1(1): 62-67.]
- [16] 刘强, 陈怡, 滕飞, 等. 中国深度脱碳路径及政策分析. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(9): 162-170. [LIU Q, CHEN Y, TENG F, et al. Pathway and policy analysis to China's deep decarbonization. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(9): 162-170.]
- [17] 姜克隽. 一个强有力的2050碳减排目标将非常有利于中国的社会经济发展. *气候变化研究进展*, 2019, 15(1): 103-106. [JIANG K J. An ambitious CO₂ mitigation target will bring much benefit to China's social economy development. *Climate Change Research*, 2019, 15(1): 103-106.]
- [18] 刘毅. 沿海地区能源供需保障与解决途径. *地理学报*, 1999, 54(6): 509-515. [LIU Y. Measures for problems of energy

- issues and supply in China's coastal region. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(6): 509-515.]
- [19] 李博, 张文忠, 余建辉, 等. 能源富集区市域经济发展水平空间格局演变: 基于晋陕蒙甘宁地区. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 668-682. [LI B, ZHANG W Z, YU J H, et al. Evolution of spatial pattern of urban economic development in energy-rich regions: Based on the Jin-Shan and Meng-Ganning Regions. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 668-682.]
- [20] 李兰兰, 徐婷婷, 李方一, 等. 中国居民天然气消费重心迁移路径及增长动因分解. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 606-619. [LI L L, XU T T, LI F Y, et al. Migration path and growth factor decomposition of natural gas consumption in China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 606-619.]
- [21] 王礼茂. 中国资源安全战略: 以石油为例. *资源科学*, 2002, 24(1): 5-10. [WANG L M. Resources security strategies in China: The case of oil resources. *Resources Science*, 2002, 24(1): 5-10.]
- [22] 史丹. 全球能源格局变化及对中国能源安全的挑战. *中外能源*, 2013, 18(2): 1-7. [SHI D. Changes in global energy supply landscape and implications to China's energy security. *Sino-Global Energy*, 2013, 18(2): 1-7.]
- [23] 杨宇, 刘毅. 世界能源地理研究进展及学科发展展望. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 818-830. [YANG Y, LIU Y. Progress and prospect of world energy geography in China. *Progress in Geography*, 2013, 32(5): 818-830.]
- [24] 渠立权, 骆华松, 胡志丁, 等. 中国石油资源安全评价及保障措施. *世界地理研究*, 2017, 26(4): 11-19. [QU L Q, LUO H S, HU Z D, et al. Security evaluation of oil resources and measures on safeguard. *World Regional Studies*, 2017, 26(4): 11-19.]
- [25] DNV G L. Energy Transition Outlook 2019. <https://eto.dnvgl.com/2019/index.html#ETO2019-top>, 2019-12-10.
- [26] 吴巧生, 王华, 成金华. 中国可持续发展油气资源安全态势. *中国工业经济*, 2003, (12): 48-56. [WU Q S, WANG H, CHENG J H. Sustainable developing oil and gas resource security situation in China. *China Industrial Economy*, 2003, (12): 48-56.]
- [27] 郎一环, 王礼茂. 石油地缘政治格局的演变态势及中国的政策响应. *资源科学*, 2008, 30(12): 1778-1883. [LANG Y H, WANG L M. Evolution of petroleum geopolitical patterns and China's policy response. *Resources Science*, 2008, 30(12): 1778-1783.]
- [28] 毛汉英. 中国与俄罗斯及中亚五国能源合作前景展望. *地理科学进展*, 2013, 32(10): 1433-1443. [MAO H Y. Prospects of energy cooperation of China with Russia and Central Asian countries. *Progress in Geography*, 2013, 32(10): 1433-1443.]
- [29] 杨宇, 何则, 刘毅. “丝绸之路经济带”中国与中亚国家油气贸易合作的现状、问题与对策. *中国科学院院刊*, 2018, 33(6): 575-584. [YANG Y, HE Z, LIU Y. Global energy cooperation between China and Central Asia: Current situation, risks, and countermeasures. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(6): 575-584.]
- [30] 闫世刚, 刘曙光. 新能源安全观下的中国能源外交. *国际问题研究*, 2014, (2): 109-117. [YAN S G, LIU S G. China's energy diplomacy under the new energy security concept. *International Studies*, 2014, (2): 109-117.]
- [31] 余建华. 世界能源政治与中国国际能源合作. 长春: 长春出版社, 2011. [YU J H. *World Energy Politics and China's Energy International Cooperation*. Changchun: Changchun Press, 2011.]
- [32] 申玉铭. 经济全球化与国家能源安全. *世界地理研究*, 2003, (3): 78-83. [SHEN Y M. Economic globalization and the national energy security. *World Regional Study*, 2003, (3): 78-83.]

System dynamics simulation on China's energy consumption in 2050: Based on the policy scenarios of key industries

HE Ze^{1,2,3,4}, ZHOU Yan-nan^{1,2,3}, LIU Yi^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling/Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Strategy Research of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Guangzhou 510070, China; 4. Department of Human Geography and Spatial Planning, Utrecht University, Utrecht 3584CB, Netherlands)

Abstract: Based on the new trend of world energy development in 2050 and the reality of China's development, how to realize energy transition and ensure oil and gas demand is a major forward-looking issue concerning China's national security. This study simulates the changes in the quantity and structure of primary energy of China based on the policy scenarios of key industries. And it also analyzes the demand of oil and gas in China and its oversea dependence in 2050. The results show that: (1) By implementing the active energy transition policies, the value of primary energy consumption is expected to peak in 2040, with a maximum value of 5755 to 7000 mtce. For different types of energy, coal consumption can reach its peak by 2030, oil consumption will peak in 2040 under both transition scenarios, and natural gas consumption will peak in 2035 under accelerated transition scenario. (2) From the perspective of advancing the transition of the energy structure, China's coal consumption will account for 21% of the total energy amount in 2050 under the transition scenario, and coal will account for less than 10% of total energy consumption by 2050 under the accelerated transition scenario. In both of the transition and the accelerated transition scenarios, oil and gas consumption will account for 30% of China's total energy amount in 2050. If a more active transition policy is implemented, no-fossil energy will be the most important energy sources for China in 2050 in the accelerated transition scenario. (3) High demand and relatively low domestic production of oil/gas will lead to a high level of China's oversea dependence in a mid- and long-term trend. Therefore, the supply of oil and gas to the national energy security in 2050 cannot be ignored based on the policy scenarios of key industries. This research can provide a scientific basis for the policy making of China's energy security.

Keywords: energy consumption; energy structure; energy transition; energy security; scenario simulation; 2050; China