

全球能源转型及我国能源革命战略系统分析

赵云龙^{1,2,3}, 孔庚^{1,2,3}, 李卓然^{1,2,3}, 麻林巍^{1,2,3}, 倪维斗^{1,2,3}

(1. 清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 3. 清华-BP 清洁能源研究与教育中心, 北京 100084)

摘要: 能源革命是实现能源系统与经济社会、生态环境协调发展的重要途径, 能源战略对国家和地区能源革命进程的推进具有重大影响。本文提出了一种用于能源战略分析的“SEGO”系统分析方法, 从能源挑战、能源系统、能源治理和能源市场 4 个要素及其关系出发, 对全球能源转型及我国能源革命战略进行了系统分析。研究表明, 全球面临能源公平、能源安全和能源绿色化多重能源挑战, 且缺乏强有力的全球能源治理, 导致全球能源系统转型总体较为缓慢, 中国被期望在推动全球能源系统转型中起到更加积极主动的作用; 我国的能源可持续发展逐步推进, 在能源革命过程中面临能源系统集成等挑战, 但政治意愿坚定, 有效推动了能源转型, 实现了少耗能、少排放。研究建议, 我国能源革命应从经济社会、生态环境的全景视角下, 做好能源发展的全局系统优化和全程精细管控, 尤其做好不同类型能源网络之间共建、共享、共调的深度协同, 加速能源新技术、新产业的颠覆式创新。

关键词: 能源转型; 全球能源系统; 中国能源系统; SEGO

中图分类号: T-9; TK-9; F123 **文献标识码:** A

Strategic Analysis of Global Energy Transition and China's Energy Revolution

Zhao Yunlong^{1,2,3}, Kong Geng^{1,2,3}, Li Zhuoran^{1,2,3}, Ma Linwei^{1,2,3}, Ni Weidou^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory for Control and Simulation of Power System and Power Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Tsinghua-BP Clean Energy Research and Education Centre, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Energy revolution is important for realizing the coordinated development of energy system, economic society, and ecological environment. Energy strategies significantly influence the process of national and regional energy revolutions. In this article, we propose a systemic analysis method for energy strategies called SEGO (i.e., sustainable development, energy system, governance of society, and operation of market). Based on this, the global energy transition and China's energy revolution strategy are analyzed from four aspects: energy challenge, energy system, energy governance, and energy market as well as their relationship. The results show that the world faces multiple energy challenges regarding energy equity, energy security, and green energy. Meanwhile, lack of strong energy governance has led to a low progress of the global energy transition. China is expected to play a more active role in promoting global energy transition. Although China has achieved less energy consumption and less emissions in its development, it still faces

收稿日期: 2020-11-25; **修回日期:** 2020-12-05

通讯作者: 麻林巍, 清华-BP 清洁能源研究与教育中心副教授, 研究方向为能源系统与能源战略; E-mail: malinwei@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“推进能源生产和消费革命(2035)——能源革命推动经济社会发展和生态环境保护战略研究”(2018-ZD-11)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

severe challenges in multiple aspects such as energy system integration. China should focus on the overall optimization and fine management of its energy system while considering economic development and ecological protection. The co-construction, sharing, and co-adjustment should be further coordinated among different types of energy networks. Moreover, disruptive innovation in new energy technologies and industries should be encouraged.

Keywords: energy transition; global energy system; China's energy system; sustainable development, energy system, governance of society, and operation of market (SEGO)

一、前言

推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系，是我国能源发展的重要战略。2016年，国家发展和改革委员会、国家能源局印发的《能源生产和消费革命战略（2016—2030）》中提出了“四个革命，一个合作”的战略任务。从系统角度看，“四个革命，一个合作”并不是各自分立的，而是具有较强内在关联的一个有机系统。随着我国全球化进程的不断深入，也有必要从全球能源发展的高度动态审视中国的能源生产和消费革命战略，推动能源转型，促进经济社会发展和生态环境保护。

为对能源战略进行系统分析，本文建立了SEGO（sustainable development, energy system, governance of society, operation of market）方法，

结合可持续发展、能源系统、社会治理、市场运行等因素，对全球能源转型及我国能源革命进行探讨，提出推动我国能源革命进程的建议。

二、研究方法

能源战略可以理解为：一个特定的社会组织为应对能源可持续发展的相关挑战，从整体社会治理角度所提出的能源系统发展的统领性计划。该计划主要作用于能源市场运行，最终影响能源系统的物理构成和技术性能，以实现特定的社会治理和可持续发展目标。本文运用SEGO方法对能源战略进行系统分析（见图1）。该方法包含4个基本要素：①可持续发展面临的相关能源挑战，简称能源挑战；②能源供应、转化、消费和基础设施的物理系统，简称能源系统；③与能源相关的社会治理，简称能源治理；④与能源

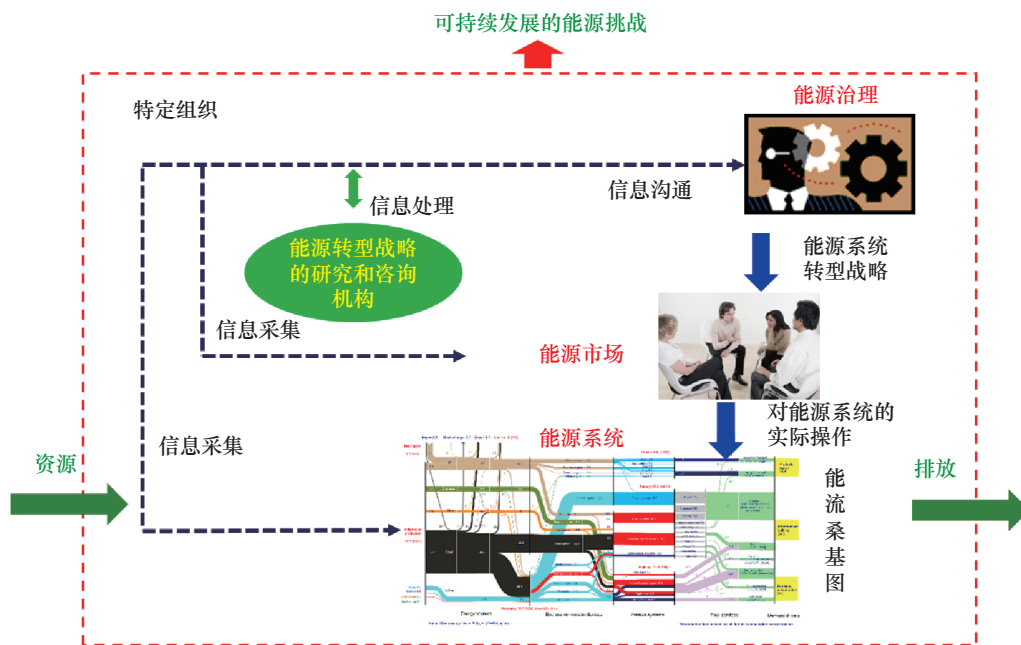


图1 SEGO 能源战略分析方法框架示意图

相关的市场运行，简称能源市场。

（一）能源挑战

能源是可持续发展的必要支撑条件。可持续发展的能源挑战指为了满足人们日益增长的需要，特定社会组织因面临能源、资源和环境等方面的约束而提出的对一些问题和现象的质疑。国际应用系统分析研究所（IIASA）将全球面临的能源挑战划分为能源公平、能源供应安全、能源绿色化三类 [1]。

针对能源领域的挑战，不同国家和地区需根据实际情况进行调整，如对发展中国家来说，经济发展仍是国家发展的首要任务。中国能源可持续发展的目标是满足经济发展所需的动力需求、保障能源安全、保护公众健康与生态环境、消除能源贫困 [2]。因此，在分析具体国家或地区的能源挑战时，首先要明确社会组织的需求；其次要明确不同能源挑战的优先级，确保更合理地应对能源挑战；再次，对特定区域的社会状况和资源环境等边界条件进行描述；最后，辨识在当前环境下的能源需求，明确满足能源需求所面临的可持续发展挑战，以更好应对。

（二）能源系统

能源系统是能源进行转化和利用的载体，是将能源资源转变为社会生产和生活所需要的特定能量服务形式（有用能）的过程。能源利用链包括来源、运输、转化、分配和终端利用 5 个过程。世界各国的能源系统存在差异，面对可持续发展挑战，能源系统的优化是必要措施，亟需开展能源系统的深入分析。

能源系统分析是以系统整体最优为目标，对能源系统从生产到终端利用的各个环节进行定性与定量分析，从而为决策者提供参考。在进行能源系统分析时，首先要明确研究区域能源系统的组成结构，确定系统边界及相关环节和部门、物理系统运作的原理，利用模型和方法描绘该区域能源系统的概貌。在此基础上，着手进行调研，采集相关数据填充模型，分析系统变化规律与影响。最后，结合面临的能源挑战，在能源物理系统中找出问题产生的根源，提出改进措施和可行性方案。

（三）能源治理

能源领域公共产品属性和外部性问题突出，亟

需通过治理来解决。根据联合国的定义，治理指行使经济、政治、行政权力以管理国家和地区的各级事务。能源治理指如何就提供能源服务而进行的社会治理，通常包括作出决定的行为者、制度和程序，涉及与能源有关的行动者，如政府、非政府组织、公司、公民、公私伙伴关系和与能源规则有关的议程制定、谈判、执行、监测、执行程序。

目前，在国家及全球层面支撑能源治理的目标均是应对能源的可持续发展挑战，但侧重点各有不同。国家能源治理是为了应对能源供应安全挑战，而全球能源治理主要是为了应对能源公平和能源绿色化的挑战。

（四）能源市场

能源市场指交换商品为能源商品的市场。能源市场的运行主要涉及能源开发利用的人或组织的日常行为和相应机制。对能源市场运行的研究分析，是能源战略系统分析的重要组成部分。

能源市场运行分析的过程为：首先，识别某区域参与能源市场的利益相关方，确定影响能源市场构成与运行的人或组织；其次，明确各利益相关方在该区域能源市场中扮演的角色及其利益诉求，确定市场利益相关者之间的现行机制与模式，分析现有机制形成的特点，探讨是否存在因利益冲突而无法满足社会治理要求的问题；最后，针对市场运行现状与治理目标之间存在的可能冲突，提出能源市场协调与优化的方向。

（五）SEGO 方法的整体统一性

SEGO 方法四要素间具有整体统一性，以能源挑战为原因、能源系统为主要载体、能源治理为手段、能源市场为传导机制，共同构成能源与生态、环境、经济、社会等交融互联的复杂动态机制，成为能源系统战略分析中不可或缺的组成部分。具体来看，要素间的联系为：为有效应对能源挑战，首先要理解能源系统的基本构成、发展趋势以及未来的技术选项；为实现能源系统的转型调整，需要能源治理层面的整合协调机制；由于不同国家和地区间的能源治理模式存在差异，利益相关方也不尽相同，能源作为一种商品必须通过市场由生产者传向消费者，实现能源的终端利用，因此，需理解能源市场运行机制，探讨利益冲突问题，使能源系统转

型在能源治理的干预和指导下，更好地满足全社会的能源消费需求。

具体地，能源挑战应依据世界或国家能源发展中已遇到或可能遇到的困难，讲明世界或国家面临的能源发展困局；能源系统应围绕目标区域的能源生产结构、消费结构等展开；能源治理应以某区域的能源治理结构为核心，厘清权力结构和治理模式，提出改革建议；能源市场旨在阐明某区域能源市场的主要利益相关者，理清能源市场主体间的关系及冲突，提出面向市场体制与机制发展的建议。

三、全球能源转型的系统分析及其启示

（一）全球能源挑战

根据 IASA 对全球能源挑战的划分，能源公平是指为全人类提供可支付得起的能源服务。目前，全球仍有 26 亿多人无法获得现代能源服务，而能源公平问题主要受能源供应和能源成本两方面影响。某一地区能源的稳定提供在于稳定的能源输送，由于能源商品具有危险性和不易保存性，能源稳定输送在一定程度上依赖能源基础设施。对经济发展水平落后的国家来说，基础设施投资不足致使基础设施建设水平严重滞后，无法保障稳定的能源输送。另外，能源的有限性需要人们对所使用的能源支付成本，特别是在一些能源资源禀赋匮乏的地区，能源的运输成本以及关税等将能源价格推高，从而进一步加剧了能源贫困。

能源供应安全指对能源系统各部分增长的能源需求有安全的能源供应能力，可以防范并减少与能源相关的风险和间歇性供应中断，不断扩大储能能力。传统能源安全主要指石油的供应安全，而在现代能源安全观中，电力也被视为能源安全的重要组成部分。能源供应安全问题从本质上讲源于资源的分布不均。当一个国家对能源进口产生依赖时，能源供应安全问题就会变得显著。而目前世界能源市场机制的不完善导致能源被部分国家垄断，加大了其他国家出现能源供应危机的风险。另外，资源、市场、基础设施等也是能源供应安全问题产生的诱因。

能源绿色化指在能源生产和利用过程中，从以较低的比例利用绿色能源的状态逐渐向以更高比例利用绿色能源的状态过渡的过程。能源绿色化主要

解决环境保护和生态两方面问题。其中，环境保护问题主要包括空气、水和土壤的治理问题；生态方面，不合理的能源结构导致生态系统的非正常化现象，如全球气候变化、臭氧层空洞等。

过去人们一直致力于用化石能源来解决能源贫困和供应安全问题，但化石燃料的过度使用带来了显著的负面影响，难以同时兼顾能源绿色化。因此，为尽可能同时实现能源公平、能源供应安全和能源绿色化，首先，需要从能源系统，即物理系统层面提出更适应目标要求的解决方案；其次，能源与国家安全、区域安全息息相关，社会治理结构和相关制度要与能源发展相适应并协调配合，形成实现能源转型三元目标的制度保障；最后，在已经形成的局域性能源市场基础上，在区域和世界层面形成更完善的市场机制，充分发挥市场的资源调配和优化配置功能。

（二）全球能源系统

重塑世界能源体系需要各个国家共同努力和协作应对，促使能源体系发生重大的根本性变革。尽管清洁能源、绿色能源的概念逐步被认识并看好，但是化石能源的主导地位到目前为止依旧没有出现明显的减弱迹象。根据国际能源署（IEA）统计数据显示（见图 2），2016 年全球煤炭、石油、天然气三大传统化石能源占一次能源生产总量的比例高达 81.4%，仍居于绝对的核心和主导地位 [3]。

虽然化石能源仍是解决能源贫困等挑战的主要途径，然而对这一路径的过度依赖，使全球生态体

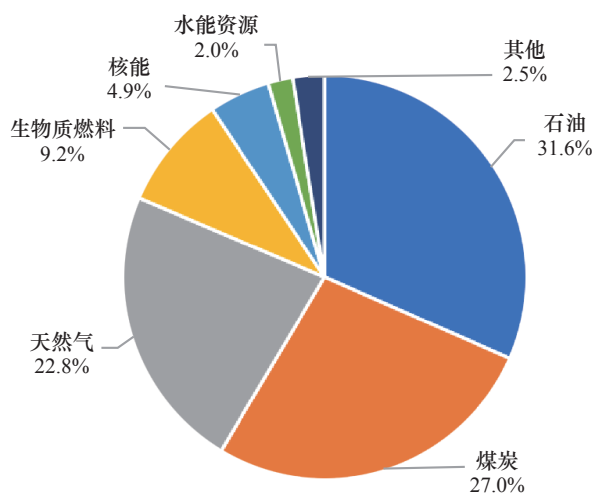


图 2 2016 年全球一次能源生产总量的分布情况

系承受巨大压力。为解决该困局，提倡在总量上控制化石能源的消费量，同时注重内部结构的合理调整。从 IEA 基于电热当量法绘制的 2016 年能源桑基图中可以看出 [4]，在能源终端消费方面，全球约有 65% 的石油用于交通领域，超过 67% 的煤炭用于电力行业，约有 58% 的天然气用于工业和建筑领域。从总体消费用途来看，全球约有 28.8% 的能源用于工业领域，28.8% 的能源用于交通领域，33.3% 的能源用于建筑领域。因此可以看出，目前工业、交通运输、建筑三大领域对化石能源的依赖程度依然较高。具体来看，在宏观层面，全球能源使用结构固化问题仍然严重，亟需从物理结构上调整能源终端消费结构。在微观层面，交通运输领域对石油能源的依赖程度很高，可通过采用先进发动设备和大力发展新能源汽车、燃料电池等降低该领域对石油的依赖；工业领域对煤炭严重依赖，需要相关部门出台更严格的监督管理措施，加强政府机构对工业企业能源利用的合理引导，配合税收等行政手段对能源利用结构进行调整；在建筑领域，从使用分布式、可再生、易获取的清洁能源入手，发展清洁低碳的建筑能耗结构。

（三）全球能源治理

全球治理即从全球视角出发的社会治理，包括两种模式：一是强调多主体参与的、多边力量共同主导的全球治理模式；二是以个别国家掌握主要权力的超级大国模式。全球大多数国家希望形成更加平等互惠，有利于维护全世界和平稳定、经济发展的由多边力量共同主导的全球治理模式。能源是国民经济的重要命脉，在国际政治关系中扮演着重要

角色。在全球多边政治力量角逐过程中形成的国际组织，如联合国，围绕能源领域一直进行着控制和协调。除此之外，为促进世界或区域能源的安全与可持续发展，一些专门针对能源治理管控的国际间组织也逐步形成，如石油输出国组织（OPEC）和 IEA。

目前全球能源治理的主要问题是面对美国长期以来的超级大国地位，国际组织在能源治理方面发挥的作用有限。而世界多数国家希望形成的多边力量共同主导的全球治理模式和美国希望延续的超级大国模式间的博弈带来较多不确定性，同时，能源领域各国各自为战的情况也较为普遍。因此，全球能源治理现状既为能源的清洁低碳化发展带来挑战，也为全球各方组织力量的变化带来历史机遇。

（四）全球能源市场

能源作为一类商品在世界范围内流通和贸易，从市场观点出发进行能源问题分析具有重要价值。能源在市场中的主要形式有能源商品的现货贸易、期货交易和能源技术的合作共享。世界能源贸易体系由能源生产国、过境国和主体消费国构成，国际组织如世界贸易组织（WTO），架构在上层进行统一指导和协调（见图 3）。与此同时，金融机构作为金融市场的重要参与者和中介服务机构参与到能源贸易中；部分跨国公司由于自身业务涉及全球多个地区的市场，在国际贸易中能够提供增值服务或具备参与优势，也会参与到能源贸易中。以 WTO 为代表的国际组织作为最上层的能源贸易协调和管理体系，对整个贸易条款的签订、贸易的实施环节进行管控。

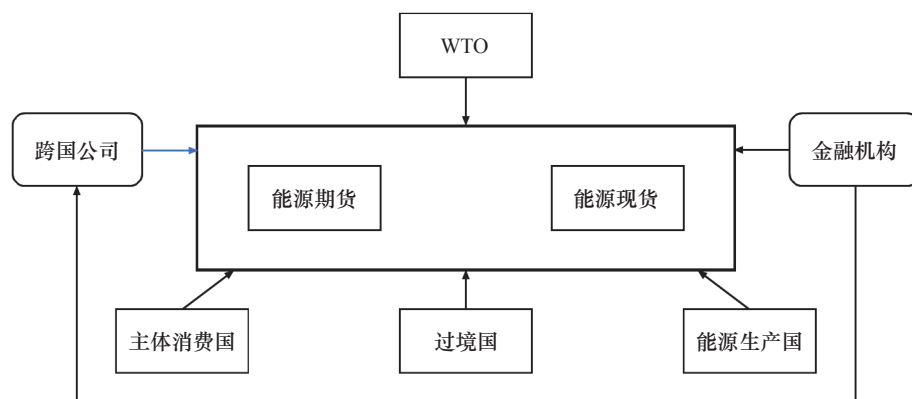


图 3 世界能源贸易体系模型图（简易）

在能源贸易过程中，由于部分国家结构性权力的存在，部分超级大国的影响力较强，并通过WTO、金融机构和跨国公司对能源贸易进行干涉。为此，应当建立以市场为中心的能源商品贸易机制，促进能源商品化，充分发挥市场的优化资源配置功能，同时辅以必要的区域治理和社会治理结构优化，建立更加成熟的能源运行体系。

（五）总结与启示

目前，全球能源系统面临公平化、供应安全和绿色化发展挑战，存在严峻的不确定性，化石能源占据全球一次能源生产的主导地位。全球能源系统的结构转型亟需强有力的全球治理。而国际组织在能源和气候变化领域的领导能力有限，地区冲突和发展目标的不同导致世界能源的统一领导体制难以建立。能源的商品属性要求建立完善的市场机制推动国家间的能源贸易往来。能源系统、治理体系和市场机制的全面完善，才可以推动世界能源体系朝资源利用更加低碳、层次更加合理的现代化方向转型。

全球能源系统的现状分析对中国具有启示意义。首先，能源系统的有序转型和健康发展离不开有效统一的国家治理。在能源问题上具有高度统一的领导和高效坚决的执行力，于国于民都将有所裨益。其次，能源的商品属性不容忽视，能源市场是连接能源生产转化端和消费利用端的重要桥梁。中国应积极主动地参与到世界能源市场体系的构建当中，为世界能源体系的发展作出贡献，同时使我国能源体系不断迈向成熟。

四、我国能源战略的分析及其启示

（一）我国能源挑战

作为发展中国家，除了能源公平、能源安全、能源绿色化这世界共同的三大能源挑战外，我国还需要协调好经济发展与能源挑战的关系。我国能源可持续发展面临五大能源挑战 [2]：巨大且持续增长的能源需求、快速增加的油气进口依存度、严重的常规环境污染、农村和小城镇缺乏清洁能源服务、巨大且迅速增长的温室气体排放。

1. 巨大且持续增长的能源需求

我国能源需求总量巨大，2018年我国一次能

源消费总量达到 4.58×10^9 tce，占世界一次能源消费总量的 23.6%。同时，我国的能源需求仍在持续增长，如 2007—2018 年，我国能源消费平均年增长率达到了 3.9% [5]。为此，我国提出的目标为：到 2030 年能源消费总量控制在 6.0×10^9 tce 以内，到 2050 年能源消费总量基本稳定。

2. 快速增加的油气对外依存度

我国能源资源禀赋的特点是“富煤贫油少气”。2018 年，我国原油进口总量为 4.6×10^8 t，进口依存度达 72.9%。天然气对外依存度的增长也十分迅猛，从 2007 年的 2% 增加到 2018 年的 43.7% [5]。

3. 严重的常规环境污染

我国常规环境污染和生态破坏问题仍然十分严峻。常规环境污染主要是大气污染、水污染和土壤污染，还包括臭氧层损耗、持续性有机物污染等问题。经过长期的污染治理工作，我国整体环境已得到了极大改善，但问题仍然存在：个别地区全年优良天气天数比例仍不到 60%；磷污染问题凸显，超标水域断面达 19.7%；部分重有色金属矿区及周边耕地土壤环境问题较为突出 [6]。

4. 农村和小城镇缺乏清洁能源服务

相比于城镇地区，农村地区缺乏高效清洁的能源服务，具体体现为：能源公平问题突出，能源消费层次较低；劣质散煤利用量大，燃煤污染排放严重；能源基础设施落后；可再生能源利用度低 [7]。

5. 巨大且迅速增长的温室气体排放

2018 年，中国与能源相关的 CO_2 排放量达 9.43×10^9 t，在世界能源相关碳排放总量中占比为 27.8%。2008—2018 年，我国能源相关 CO_2 年排放量增长了 2.02×10^9 t，年增长率达 3.2% [8]。2015 年我国在巴黎气候变化大会上作出承诺，将于 2030 年左右使 CO_2 排放达到峰值并争取尽早实现。2030 年之后，我国将面临控制碳排放总量的国际压力，这对我国能源发展提出更加严峻的挑战。

在上述我国的能源挑战中，持续增长的能源需求是为了满足我国经济发展所需要的动力需求，农村和小城镇地区缺乏清洁能源服务属于能源公平问题，油气对外依存度的快速增长属于能源安全问题，环境污染和温室气体排放则属于能源绿色化问题。总之，对我国而言，最重要的问题仍是为经济发展提供能源，同时逐步解决现有的能

源公平、能源安全和能源绿色化问题，确保能源可持续发展。

(二) 我国能源系统

1965—2019 年，一次能源消费量（见图 4）及消费结构（见图 5）的变化情况显示 [8]：我国一次能源消费量从 1.87×10^8 tce 增长到 4.83×10^8 tce，年均增长率为 6.25%；而能源相关 CO_2 排放量则从 4.89×10^8 t 增加到 9.83×10^9 t，年均增长率为 5.74%；在此期间，煤炭始终占据能源主力位置，但占比从 87.0% 下降至 57.4%。

能源资源的粗犷式利用为我国社会、环境、气候等带来诸多问题，为解决这一问题，近十几年来

能源发展逐渐进入转型期。一方面，能源消费呈持续增长趋势，我国一次能源消费量在 2009 年首次跃居全球首位，成为全球最大的能源消费国。另一方面，能源转型成果显著。2007—2018 年，由于控制总能耗，能源消费年均增长率骤降至 3.89%；可再生能源消费量年均增长率为 12.54%；非化石能源在能源消费总量中的占比从 5.9% 增长至 13.9%；煤炭在能源消费总量中的占比则从 73.7% 下降至 58.3%，并在 2014 年首次实现负增长，能源相关碳排放也在 2014 年首次实现下降。目前，我国能源发展正处于从高速发展向高质量发展的转型阶段，协调好满足经济发展与人民美好生活需要和实现清洁低碳安全高效等目标间的关系是中国能源系统未

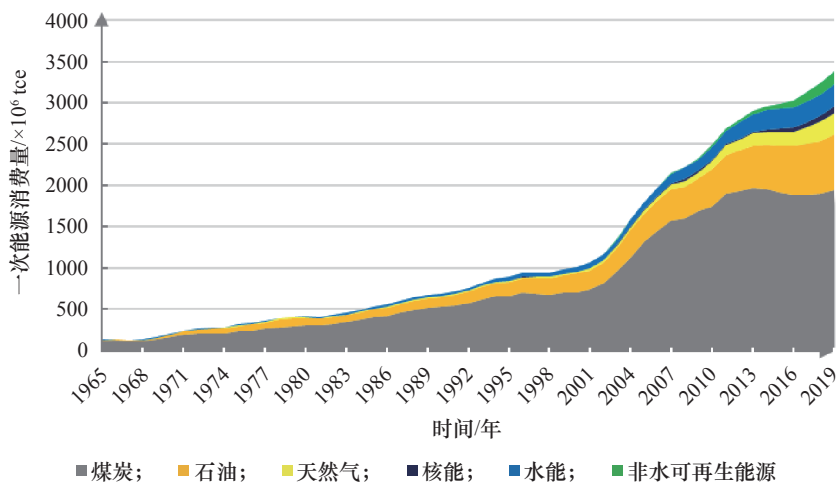


图 4 中国一次能源消费量历史变化曲线

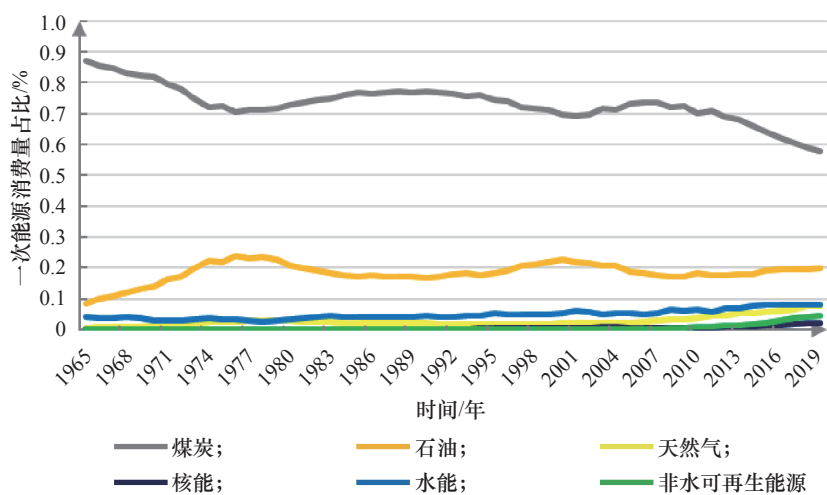


图 5 中国一次能源消费结构变化曲线

来发展的重要问题。

（三）我国能源治理

在我国能源治理中，政府发挥着决定性作用，组织各利益相关方形成能源治理的制度和规则，并对其他利益相关方进行引导和监督。中央政府把握能源治理的主旋律和大方向，提出能源发展的战略目标和实施方案，各级地方政府在此基础上制定各自的能源发展规划，自上而下地实现能源治理。

我国政府的能源治理行为具体体现在：在政治意识方面，节约资源、保护环境，增强可持续发展能力是我国历届国家领导人的共识，从将改善生态环境作为全面建设小康社会的目标之一，到“绿水青山就是金山银山”的生态文明理念，始终在坚持以经济发展为中心的同时，不断提升对可持续发展的重视程度。在国家战略规划方面，国家对能源领域的规划主要通过制定五年规划来体现。总之，通过开展能源革命，优化能源消费结构，提高能源利用效率，在我国建立清洁低碳、安全高效的现代能源体系。

能源治理的利益相关方包括政府、民间社会团体（行业协会、非营利性组织等）、能源企业、公民等，这些利益相关方在政府的领导和组织下，发挥各自的不同作用。

面对可持续发展的能源挑战，我国仍需进一步加强能源治理：在维持经济增长的同时，控制能源消费总量；改善一次能源消费结构，进一步减少化石能源的比重，增加可再生能源的使用；提高能源利用效率，推广先进能源利用技术，逐步淘汰落后产能；提升终端能源服务水平，进一步推进终端能源服务的电气化。

（四）我国能源市场

我国能源市场的主要运行形式与贸易模型和世界能源市场的基本相同，即我国能源市场运行中的主要形式也包括了能源商品的直接贸易、能源技术的合作共享以及能源期货的交易买卖；贸易的基本模式包括了能源的生产者、运输者和消费者，并由政府部门在上层进行统一的指导协调。与世界能源市场的不同主要表现在：①我国政府在上层的协调指导能力远高于国际组织，在能源市场中发挥着更大作用；②我国能源市场中绝大多数运输者和生产

者的角色是由国有企业担任，可根据区域的实际需求，对能源价格有所调整；③与世界能源市场的发展情况相比，我国能源市场的期货市场发展还不够完善。

（五）总结与启示

面对我国在能源公平、能源安全、能源绿色化和经济发展需求等方面的挑战，需要在了解能源系统发展现状的同时，进一步加强对我国能源系统的优化，包括加强被动系统的设计、加强基础设施的联通、推广节能技术、增强能源系统灵活性和可再生能源消纳能力。为实现对能源系统优化，需要在能源治理上进行战略调整，而能源治理相关措施的落地，则需要运用有效的政策工具来引导能源市场的运行。今后仍要进一步完善能源治理的相关制度和规则，同时继续推进能源的市场化，完善能源市场。

五、结论及政策建议

（一）主要发现

本文提出了一套“SEGO”能源战略系统分析方法，从可持续发展、能源系统、能源治理和能源市场运行方面对全球能源转型和中国能源革命进行了探讨。

全球面临能源公平、能源安全和能源绿色化等多重能源挑战。由于缺乏强有力的全球能源治理体系，各国能源战略难以得到有效整合以及在全球层面一致、有力地执行，导致全球能源系统转型总体较为缓慢，中国被期望在推动全球能源系统转型中起到更加积极主动的作用。

我国的能源挑战愈发复杂和严峻，但由于政治意愿坚定，形成了“控总量、调结构”的系列能源战略共识，有效推动能源转型，实现了少耗能、少排放。然而，随着深度节能要求的不断提高、可再生能源的大规模引入以及信息通信技术的发展，能源系统集成（核心是基础设施）将成为巨大挑战和重大机遇。中国能源系统的发展应在经济、社会、生态环境全景视角下进行全局系统优化和全程精细管控，做好电力、热力和燃料等多种不同类型能源网络之间共建、共享、共调的深度协同，加速可再生能源和信息通信技术等新技

术、新产业的颠覆式创新。

(二) 政策建议

1. 加强领导和管理，树立“节能低碳第一、坚决抑制浪费”理念

在政策引导、发展规划、市场监管、金融支持等能源治理的各方面，牢固树立“节能低碳第一、坚决抑制浪费”的理念。为加强能源战略决策和统筹协调，在国家能源委员会的领导下，各主要区域成立跨区域能源委员会，加强对主要区域在推进能源革命方面的统筹领导和管理，做好能源发展的全局系统优化和全程精细管控。

2. 加强“两个协调”，做好能源革命的相关规划

在国家和区域层面，加强能源规划与经济社会、生态环境规划等的协调；同时，加强区域间能源规划的协调，出台主要区域的跨省市能源革命长期规划和能源发展五年规划，积极推动能源转型，使能源革命战略的相关要求可以具体实施。

3. 以促进创新为导向，大力深化能源市场改革

加快研究和出台有效的政策工具，进一步促进能源市场开放，回归能源商品属性，鼓励民营资本进入更多领域。允许各主要区域自主创新，加速能源新技术、新产业的颠覆式创新，提出适合本区域的特有能源市场改革方案，加强区域能源市场改革经验的交流和分享。

4. 重视多能协同技术和系统的发展

建议将多能协同技术和系统的发展，提升到国家能源战略层面，作为重大系统工程的国家攻关项目来推进，如煤炭和生物质耦合发电供热技术。鼓励各主要区域视自身情况，提出自主创新的协同技术和系统方案，并支持开展示范应用和推广。

参考文献

- [1] Jefferson M. A global energy assessment [J/OL]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 2016, 5(1): 7-15. (2015-12-19) [2020-08-26]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wene.179/full>.
- [2] 倪维斗, 陈贞, 李政. 我国能源现状及某些重要战略对策 [J]. 中国能源, 2008, 30(12): 5-9.
Ni W D, Chen Z, Li Z. Energy challenges and some important strategies in China [J]. Energy of China, 2008, 30(12): 5-9.
- [3] International Energy Agency. Data and statistics [EB/OL]. (2017-08-09) [2020-08-26]. [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20\(TPES\)%20by%20source](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20(TPES)%20by%20source).
- [4] International Energy Agency. World balance [EB/OL]. (2017-08-09) [2020-08-26]. <https://www.iea.org/sankey/>.
- [5] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Department of Energy Statistics of National Bureau of Statistics of China. China energy statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [6] 李干杰. 国务院关于2018年度环境状况和环境保护目标完成情况的报告 [EB/OL]. (2019-04-21) [2020-08-26]. http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/201904/3ad3a437851a4d4d9bd797d52fe958bb.shtml?utm_source=UfqNews.
Li G J. Report of the State Council on the completion of environmental status and environmental protection objectives in 2018 [EB/OL]. (2019-04-21) [2020-08-26]. http://www.npc.gov.cn/npc/c30834/201904/3ad3a437851a4d4d9bd797d52fe958bb.shtml?utm_source=UfqNews.
- [7] 倪维斗, 江亿, 麻林巍, 等. 农村能源技术领域的若干重大问题分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Ni W D, Jiang Y, Ma L W, et al. Analysis on some important problems in rural energy technology field [M]. Beijing: China Science Press, 2019.
- [8] BP. BP世界能源统计年鉴2020 [EB/OL]. (2020-02-01) [2020-08-26]. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/xlsx/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-all-data.xlsx>.
BP. BP world statistical yearbook 2020 [EB/OL]. (2020-02-01) [2020-08-26]. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/xlsx/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-all-data.xlsx>.