

# 国家能源低碳转型与可再生能源发展： 限制因素、供给特征与成本竞争力比较

马丽梅 史丹 裴庆冰

内容提要: 在新一轮产业革命与技术革命的背景下, 第三次能源转型正悄然发生, 对国家能源体系及经济发展均产生了重要影响。此次能源转型对于国家而言, 更深层次的意义在于, 新能源产业及低碳技术发展将是拉动经济增长的重要引擎, 是国家重塑全球产业竞争力的重要途径和标志。文章从经济学视角分析了重要转型能源( 可再生能源) 的供给特征与成本竞争力, 将经济学与资源本身的物理特性相结合, 诠释可再生能源发展的经济机遇及其面临的严峻挑战。

关键词: 产业经济 可再生能源 核能 能源转型 EROI

中图分类号: F062.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-3947(2018)05-0070-10

## 一、引言

进入 21 世纪以来, 随着国际社会对保障能源安全、应对气候变化、保护生态环境等可持续发展问题的日益重视, 加快推进能源转型已成为世界各国的普遍共识和一致行动, 可再生能源发展成为此次能源转型的重要内容。近年来, 国内外学者围绕能源转型与可再生能源展开了广泛的探讨。赵勇强(2017)认为, 可再生能源已成为全球能源转型的核心, 正在逐步重构能源体系, 并将成为绿色经济发展的重要力量。现有研究将侧重点集中于两个问题, 一是能源转型过程中可再生能源发展的影响因素, 并特别探讨可再生能源消费与经济增长的互动关联; 二是国家未来能源转型的路线图及前景规划。加拿大学者佩里·萨多尔斯基较早地对 G7 集团国家(美国、英国、德国、法国、日本、意大利和加拿大) 可再生能源消费的驱动因素进行了分析, 他认为 GDP 和 CO<sub>2</sub> 排放量是两个关键因素(Perry Sadorsky, 2009)。葡萄牙学者安东尼奥·C. 马克斯对欧洲 24 国进行的研究发现, 能源自给率、CO<sub>2</sub> 排放、收入以及减少能源依存度是可再生能源发展的重要驱动因素, 而社会意识、减排目标以及化石能源价格均不发挥决定性作用(António Cardoso Marques et al., 2010)。针对新兴经济体的研究发现, 最终起关键性作用的影响因素是收入(Salim & Rafiq, 2012)。综上所述, 可以看到, 无论在发达国家还是新兴经济体, 经济发展水平是驱动可再生能源发展的关键性因素。诸多文献围绕二者的互动关系展开了研究, 大多数学者提出的观点认为, 可再生能源发展有利于经济增长, 二者之间是相互促进的, 也有学者认为, 可再生能源的影响要区分不同国家、不同地区进行研究讨论, 不可一概而论(Apergis & Salim, 2015)。齐绍洲、李杨(2017)基于欧盟数据进行分析发现, 可再生能源消费对经济增长的正向影响主要发生在人均 GDP 较高的成员国, 而在人均 GDP 较低的成员国可再生能源的增长则呈现负向冲击。

整体而言, 国外学术界对于可再生能源的研究起步较早, 而国内的研究大多起步于近几年。现有的国外研究将侧重点集中在对发达国家自身经济增长的意义上, 从能源转型视角分析其对后发国家经济

作者简介: 马丽梅, 管理学博士, 深圳大学中国经济特区研究中心讲师。史丹, 管理学博士, 中国社会科学院工业经济研究所研究员、博士生导师。裴庆冰, 经济学博士, 国家发展改革委能源研究所助理研究员。

基金项目: 国家自然科学基金政策研究重点支持项目“中国能源监管体系与监管政策研究”(项目编号: 71742001)。

发展意义的研究相对较少。而现有对于可再生能源成本的分析,大多集中于发电成本,忽略了对能源投资回报及外部环境成本的讨论,使得现有文献,特别是国内研究对于可再生能源自身的特性认识不足,视角较为单一,不能系统、全面、真实地反映可再生能源发展的实际情况及其区别于传统化石能源的供给特征。本文在能源转型的大背景下,结合可再生能源自身的物理属性,从经济学视角研究可再生能源的发展,更为真实全面地展示可再生能源发展面临的经济机遇与严峻挑战。

## 二、国家能源转型: 重塑产业竞争力的重要途径

### (一) 概念与历史

所谓能源转型,是指能源生产和消费结构发生根本性的改变,并对一国社会经济发展乃至全球地缘政治格局产生深刻影响。回顾世界能源转型历史,至今人类已经历了两次能源转型,第一次能源转型是以第一次工业革命为背景由生物质(如秸秆、木柴等)向煤炭的转型,1910年左右的前50年内,煤炭在世界总能源结构中的比重约每年增长8%,到1910年该比重接近60%,此后煤炭比重呈下降趋势,下降幅度约为每年3%~4%。第二次能源转型可分为两个阶段,前半段表现为石油对煤炭的替代,在以石油驱动内燃机车为核心技术的第二次工业革命背景下,汽车、飞机逐渐普及全球,1980年左右的前30年内,世界石油比重不断提高,至1980年,其比重已接近40%,已超越煤炭成为当时的第一大能源,此后受石油危机影响,其比重开始下降。此后第二次能源转型进入后半段,表现为天然气以及核电的应用增加,到2000年,核电与天然气的份额约占世界总能源消费的30%,至2014年,仍维持在30%左右。此外,整个20世纪直至21世纪,水能应用比例基本维持在6%的水平,而自2000年起,非水可再生能源开始呈现增长态势。可以看到,人类的能源转型从物质形态看,经历了由“固体”到“液体”,再由“液体”向“气体”的转型,而每一次能源转型的“降碳化”特征逐渐凸显,即替代能源的化学元素中碳元素不断减少,氢元素逐步增加,因此,亦称之为能源的低碳转型。

### (二) 第三次能源转型或将成为国家重塑产业竞争力的重要途径

目前,在新一轮产业革命的背景下,第三次能源转型已悄然发生,这次能源转型的特征在于面向可再生能源及低碳技术。历史经验表明,工业革命与能源革命几乎同时发生,能源革命能够推进工业革命以及生产力的极大提高(史丹、王蕾,2015)。此次能源变革对于国家而言,不仅仅意味着节能减排、减少对环境的冲击,更深层次的意义在于,新能源产业及低碳技术发展将是拉动经济增长的重要引擎,是国家重塑全球产业竞争力的重要途径和标志。从国际发展经验看,世界经济长远发展的动力源自创新,当前,能源、环境领域成为创新增长的重要依托,世界主要国家竞相加大能源科技研发投入,着力突破节能、低碳、储能、智能等关键技术,加快发展战略新兴产业,抢占新一轮全球能源变革和经济科技竞争的制高点。国际金融危机后,全球技术创新活动在经历短期低潮后开始复苏,技术创新渐趋活跃。工业4.0、智能制造、互联网+、分享经济、3D打印、新能源、电动汽车等新理念不断涌现,新业态、新产业蕴含巨大商机。其中,新能源产业发展日益成熟,风电、光伏发电的成本不断下降,产业规模不断扩大,规模化替代煤电指日可待;纤维素乙醇技术不断成熟,规模替代石油成为可能;电动汽车、储能技术不断完善,电动汽车替代燃油汽车已现曙光。这些都为全球第三次能源转型提供了坚实的基础支撑。

### (三) 能源转型对产业经济学研究提出了新要求

能源转型推进了低碳技术的发展,能源是工业的“血液”,低碳发展与低碳工业化将对产业结构调整提出重构价值判断的要求,产业结构演变的趋势分析要增加能源转型这一驱动因素。基于以传统工业化国家发展经验总结出来的产业发展与产业结构理论可能不再适用,需要进行新的探索。如图1显示,在2013年,从传统工业化视角进行分析,即第三产业占比看,中国处于较为落后的水平。但是,从低碳工业化水平进行分析,即可再生能源占比,中国高于美国、韩国、日本等发达国家。以低碳工业化视角进行分析,就发达国家和发展中国家的差距看,低碳工业化的差距远远小于传统工业化(史丹,2016)。

加快发展低碳工业化,也是发展中国家追赶发达国家的一个重要途径,因此需要以能源转型为背景,从崭新的视角解析产业发展新引擎及其演变趋势。

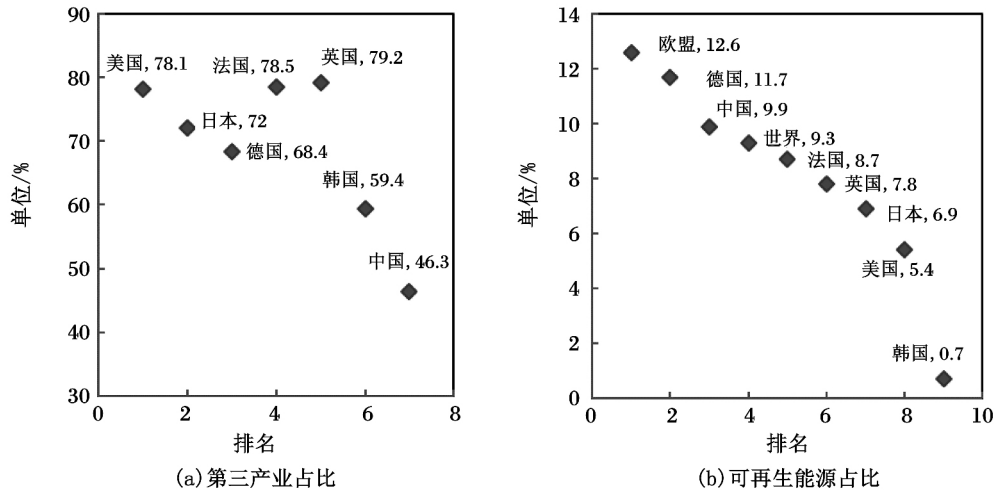
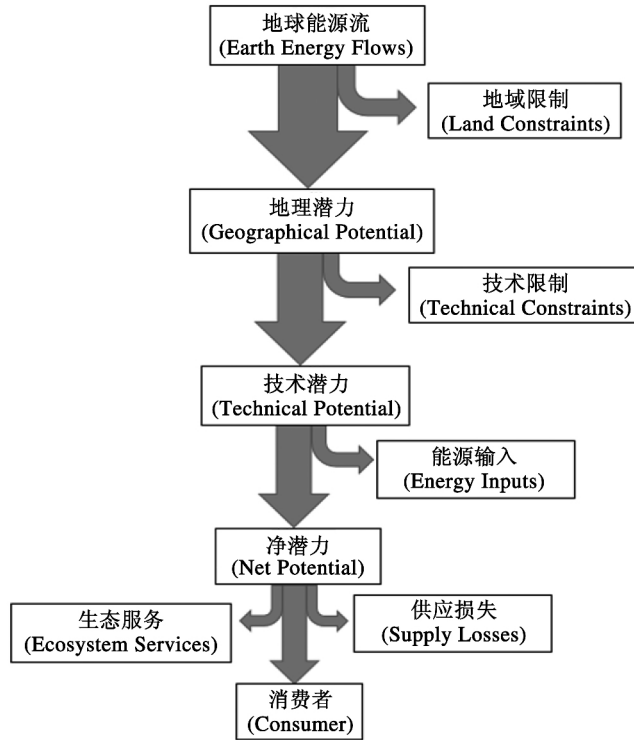


图 1: 2013 年中国与部分发达国家传统工业化与低碳工业化水平比较

### 三、可再生能源发展的限制因素与供给特征

#### (一) 可再生能源发展的限制因素

可再生能源的发展仍面临诸多困境,在理论可行的可再生能源资源中去除掉发展限制所消耗或不能利用的能源后,最终才能产生可供消费者消费的可再生能源(见图 2)。可再生能源的发展主要面临



资料来源: Moriarty & Honnery 2016。

图 2: 可再生能源发展的限制因素(从自然资源转为可消费能源)

四方面的限制: (1) 地域限制。地域限制主要限制可再生能源的获取, 这些限制主要包括复杂的地质形态(如深海、冰山、高山及森林不适合发展太阳能、风能), 以及更深层次的地域限制(例如, 公众对于风能的反对, 近年来在许多 OECD 国家越来越强烈, 其主要原因在于风能发电不仅影响市容及房地产的价格, 更在于其会导致鸟类及蝙蝠的死亡)。(2) 技术限制。可再生能源多具有间歇性、不确定性等特点, 直接并网发电将给电力系统的安全运行带来一系列严峻挑战, 因此, 存储、传输等配套问题(例如, 储能技术、智能电网)是可再生能源发展中面临的重要技术难题。(3) 能源生产损失。在生产能源产品的过程中, 所有输入的能源并不能完全转化为最终的“能源产品”, 许多技术除了能得到主要能源产品外还能获得许多副产品。(4) 生态损失和供应损失。一方面, 电网在提供终端用户能源时会造成电力损失, 而另一方面, 维持生态环境(如净化用水及废弃物分解)也要减少“净能源”的消耗。

## (二) 可再生能源的供给特征

在研究可再生能源的供给特征前, 有必要明确可再生能源的技术特征, 主要包括两点: 一是间歇性, 即它们并不是任何时候都能获得, 在发电过程中具有随机性和波动性, 因此在使用过程中需要常规火电进行调峰; 二是即时性, 即电力无法以经济的方式大容量储存, 要求在获取的同时必须即时使用。

由于间歇性的存在, 使得可再生能源的发电成本较高, 为了克服市场扭曲和缺乏外部性的内部化机制所造成的壁垒, 实践中必须通过政府干预机制来促进可再生能源的发展(郁建兴、王茵, 2017)。图 3 展示了可再生能源供给的经济逻辑(宋辉, 2011)。 $MC^{RE}$  表示可再生能源的供给时间成本,  $MC^{FE}$  表示化石能源的供给时间成本,  $S$  点表示资源配置达到最佳状态, 两种能源的边际产出成本在此处达成一致。可再生能源的供给发展主要经历四个阶段: (1)  $T_0 \rightarrow T_B$  阶段, 表现为  $MC^{RE} > MC^{FE}$ , 此时可再生能源的供给边际成本超出了实际经济体可以承受的范围, 可再生能源消费只能仅存在于小范围的“利基”<sup>①</sup>市场内; (2)  $T_B \rightarrow T_S$  阶段, 表现为  $MC^{RE} > MC^{FE}$ , 此时通过政府的激励及补贴等措施, 可再生能源已经可以进入市场运作范围; (3)  $T_S \rightarrow T_F$  阶段, 表现为  $MC^{RE} \leq MC^{FE}$ , 此时在市场条件下可再生能源即可实现规模化经营, 化石能源的部分市场被可再生能源挤占或失去原有的优势; (4)  $T_F \rightarrow T$  阶段, 此时  $MC^{RE} < MC^{FE}$ , 此种情境仅为假设情景, 或许需要在很长一段时间才能实现。按照能源转型的历史规律进行预期, 未来的能源结构呈现两种可能: 一是高比例的可再生能源情景, 即此阶段的描述成立; 二是可再生能源与化石能源呈现平分秋色的局面, 即停留在第三阶段。

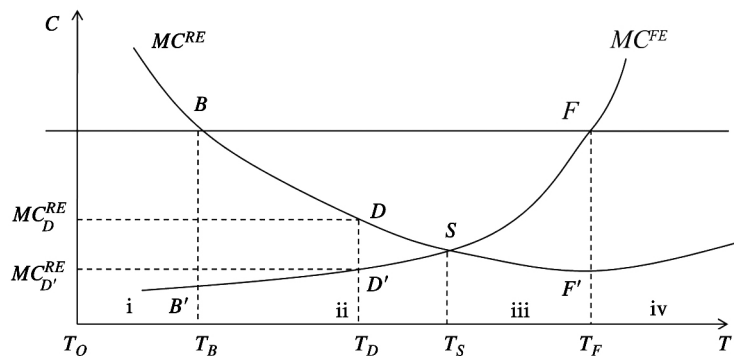


图 3: 可再生能源供给的经济逻辑

在第二阶段, 也是当前全球可再生能源发展所处的阶段, 要实现时点  $T_D$  的可再生能源供给既定规模 ( $MC_D^{RE} - MC_D^{FE}$ ) 即是政府为实现可再生能源供给的激励价格。当前, 政府对可再生能源的支持机制中, “并网价格”和“可再生能源配额”是两个较为重要的手段。“可再生能源配额”是基于产量的激励方

<sup>①</sup> 利基市场是在较大的细分市场中具有相似兴趣或需求的一小群顾客所占有的市场空间。大多数成功的创业型企业一开始并不在大市场开展业务, 而是通过识别较大市场中新兴的或未被发现的利基市场而发展业务。

法,而“并网价格”则是基于价格的激励方法。

“并网价格”(Feed-in Tariffs)是一项影响价格的干预措施,也有研究将其称为“固定电价”。法律或规制政策规定电力企业以通常高于市场价格的固定价格购买可再生能源电力。同时,“并网价格”会根据可再生能源的发电技术、电厂地理位置以及发电数量使电价有所差别,在这样的情形下,生产成本低廉的厂商会因它们的位置或技术优势而赚取一部分租金,进而激发可再生能源技术进一步创新。因此,这种方法被认为是在可再生能源发展初期激励效果比较理想的方法。“可再生能源配额”(Renewables Portfolio Standard)是通过限量机制发挥作用,政府设定可再生能源电力供应的目标,同时规定供应商必须购买一定比例的可再生能源电力,并让市场决定价格,最终实现设定目标。也有研究将其称为“可再生能源义务”(Renewable Obligation)。“并网价格”机制与“可再生能源配额”机制在执行中仍面临诸多风险,这些风险包括:价格风险、产量风险和平衡风险,从投资者角度讲,“可再生能源配额”机制均存在以上三种风险,而“并网价格”机制则回避了各种风险,相对更优(巴塔查亚 2015)。

#### 四、可再生能源的成本竞争

在考虑化石能源可能的替代品时,每种替代品都要在能源储量、能源质量和其他投入和影响(例如,土地、水、劳动力和环境健康)等方面展示其独有的特征。面临这些选择时,决策者、企业和最终用户都需要一个全面的、统一的框架将替代能源与化石能源进行比较。现有研究的视角大多锁定于对核能和化石能源的比较,或可再生能源和化石燃料之间。但就目前看,化石能源被普遍认为是气候变化与环境污染的重要原因,因此,对核能与可再生能源对于环境影响的比较分析显得更有意义。核能生产在大多数国家是一个有争议的议题,同时,越来越多的争议也围绕可再生能源的环境影响展开。根据这些讨论,本文主要从经济成本(内部成本)和外部成本(环境生态成本)两个方面进行总结分析。

##### (一) 经济成本

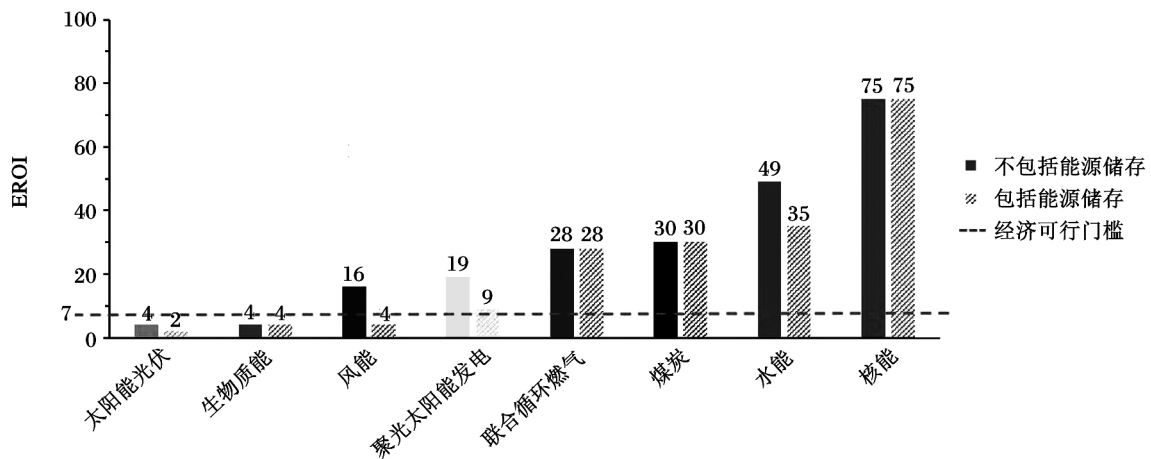
##### 1. 能源投入回报率(EROI):一个涉及经济增长的指标分析

现有的经济模型并不能为制定能源战略提供充分的依据,因为这些纯经济方法往往没有从能源对经济发展的制约视角进行分析。能源投入回报率(Energy Return on Investment, EROI)是一个能够综合考虑能源、经济和环境因素,并且在宏观层面和微观层面均适用的能源经济分析指数。目前,该指标在外国能源经济的研究中已较为普及,但国内的研究仍处于起步阶段。EROI是指能源生产过程中能源产出和能源消耗的比值,能源消耗不仅仅包括能源的基本原材料,还要包括物质输入(如水、土地、钢铁制品等)以及资本输入(如投入的劳动力等,可以用货币价值与能源强度系数进行折算),目前已存在很多种改进的计算方法,其基本计算公式为:

$$EROI_t = \frac{\sum_{i=1}^n E_{it}^o}{\sum_{i=1}^n E_{it}^c}$$

其中, $E_{it}^o$ 表示能源产出的热当量值, $E_{it}^c$ 表示能源消耗的热当量值。因此,也可以将EROI看作一个“净能源”值。EROI方法同时计算了能源产出和能源投入,既能够评价能源生产的效率和价值,还能得出为社会提供的真正能源量,即净能源量,而非总产量。图4展示了不同能源的EROI比较情况。虽然每种能源的精确EROI均存在不确定性,但可以从该图中看出大致趋势。可以看到,太阳能光伏、生物质的EROI低于经济可行门槛,而核能的EROI远高于其他能源技术,甚至高于传统的化石能源。

EROI是在能源选择过程中必须关注的一个指标,其对经济增长的重要意义也已经得到认可与讨论(Cleveland et al., 1984)。如果替代能源本身EROI水平较低或者呈下降趋势,不仅意味着能源质量的降低和生产成本的提高,更意味着供给经济系统净能源量的大幅度减少(Murphy et al., 2011),将会对未来经济的增长速度产生冲击。可再生能源虽然已成为经济增长的重要引擎,其较低的EROI也在—



资料来源: Moriarty & Honnery 2016。

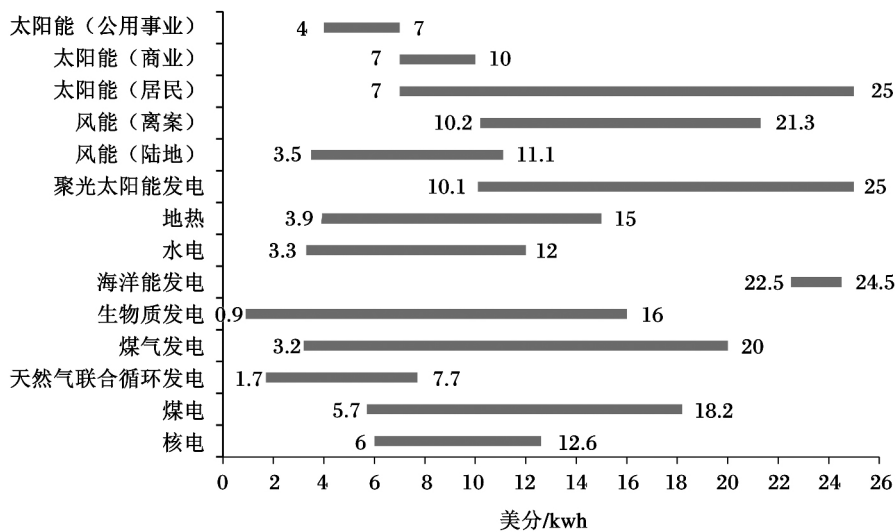
图 4: 化石能源、核能与可再生能源的能源投入回报 (EROI)

一定程度上意味着对经济增长的拉动作用可能有限。随着可再生能源技术的提高,其 EROI 可能会得到一定的提升,但就其本身的物理性质来说,提升空间有限,很难企及核能的水平。因此,对大力发展可再生能源的国家而言,EROI 是一个值得考量的重要指标,必须同时估计其对未来经济可能产生的冲击。

### 2. 发电成本

可再生能源开发与利用的关键因素之一是经济性,包括两个核心指标:发电成本和装机容量。这里因主要与核能进行比较,因此不考虑装机容量问题。从国际能源转型历史经验看,面对可再生能源带来的竞争,“旧有能源”会大幅降低价格与“新能源”竞争,以便维持其在能源市场上原有的“主导地位”。因此,向低碳能源技术转型的威胁将带来化石燃料供应公司的应对反应,这意味着它们将变得越来越具有竞争力,更加难以被替换。而且,鉴于化石能源公司在全世界经济中的重要性,它们的反应可能在能源转型史上呈现前所未有的规模,这仍是可再生能源发展面临的一大重要挑战。

图 5 给出了各类能源技术的发电成本,该结果来自德意志银行的估计数据。从最低发电成本比较,核电要高于部分可再生能源,如太阳能(公用事业)、风能(陆地)、水电等。而从最高发电成本看,大部



资料来源: Khan et al., 2017。

图 5: 化石能源、核能与可再生能源发电技术成本比较

分可再生能源发电技术成本要远高于核电成本,如太阳能(居民)、聚光太阳能发电、海洋能发电,最高发电成本分别可达 25 美分/kWh、25 美分/kWh、24.5 美分/kWh,而核能仅为 12.6 美分/kWh。整体而言,就可再生能源来讲,其发电成本在绝大多数国家仍未实现经济可行性,仍需要大量的补贴,而核能从平均成本看已具有较大竞争力。

国际可再生能源机构预测,2015~2025 年光伏平准化发电成本将降低 59%,集中式太阳能光热平准化发电成本将降低 43%,陆上风力平准化发电成本将降低 26%,海上风力平准化发电成本将降低 35%。虽然与核能相比,可再生能源发电技术成本下降迅速,但仍因发电的间歇性存在重大问题,而核能发电却具有较高的稳定性,如果储能技术得不到实质性改善,可再生能源的发展仍将受到较大制约。

### 3. 原材料及其他成本投入

这里主要从三方面进行讨论:(1) 原材料。与风能和太阳能技术有关的主要材料涉及使用“稀土”资源,钨、镨、铽、铈和钕是风力涡轮机和太阳能电池板目前依赖的重要原材料。表 1 主要展示了风能和太阳能发电技术所需的关键原材料。这些“稀土”资源可能会影响可再生能源的可用性和成本。对于控制大量稀土供应的中国来说,其作用将不断显现,据估计,世界稀土金属总产量的 90% 以上来自中国,丰富的稀土资源是中国发展可再生能源的有利条件。而在核电厂,发电需要的唯一材料就是铀,铀普遍存在,即使从海水中获取也可能保证其经济可行性。核电厂还需要大量钢铁和混凝土,这些钢铁和混凝土约占总材料投入的 95% 以上。风力发电同样需要使用大量的混凝土,与核能相比,风力发电每兆瓦容量所需的混凝土比核能的高。(2) 水的使用。联合国政府间气候变化专门委员会(简称 IPCC)第三工作组关于可再生能源的报告全面概述了用水量,该报告显示,核电耗水量大,但优于煤和沼气,但风电和太阳能发电几乎不耗费水资源。(3) 土地使用。以标准化的  $m^2/GWe$  单位计算,核电为 50/120、光伏为 329/463、风能为 1500~3200。然而,另一个有争议的问题是长期的土地使用损失潜力,对于重大核事故来说,核电的潜在损失极大(Smil 2010)。

表 1: 可再生资源技术所需的重要原材料

类型	构成	关键的原材料
风力和水力发电厂	永磁体	钨、镨、镨铽
	耐腐蚀组件	铬、镍、钼、锰
光伏	透明电极、薄膜、半导体	铟、镉铟、镓、硒、锗、碲
	染料敏化太阳能电池	钌、铂、银
	电接点	银
集中太阳能发电	反光镜	银

资料来源: Edenhofer et al., 2011。

### (二) 外部成本: 生态环境代价

生态环境成本是可再生能源利用的外部成本。外部成本主要是指可再生能源发电在其全生命周期内造成的环境损失。可再生能源本身几乎没有任何碳排放,但在可再生能源产业整个生命周期内,其他环节(包括各种发电方式所用原材料的开采和运输,发电设备的制造,电网的建设、运行及维护保养和废弃物排放与处理等所有环节)也会导致碳排放,同时也会对周边生态,特别是生物多样性造成系列影响。

#### 1. CO<sub>2</sub> 排放

据估计,建造 1GWe(百万千瓦)的核电站将产生 30 万吨二氧化碳,对于 40 年的电厂来说,核电的排放相当于大约 1gCO<sub>2</sub>/kWh。在同等情况下,化石能源的排放接近于 400gCO<sub>2</sub>/kWh,要远远高于核电的排放(MacKay 2009)。整体而言,核能和可再生能源<sup>①</sup>的排放要比化石能源的排放低得多,见图 6。

<sup>①</sup> 风能和太阳能的数字在某种程度上取决于铝在建筑风塔或太阳能发电厂的使用情况。六氟化硫与铝存在关联,六氟化硫可以产生具有相同当量二氧化碳的 3000 倍的温室气体,这是一个潜在的重要参数指标。

图 6 的数据来自国际原子能机构, IPCC 第五次评估报告也引用了该组数据。如仅考虑直接排放, 可再生能源几乎是接近零排放, 然而, 如将其纳入整个生命周期来进行分析, 则仍然面临一定的碳排放问题。核能与风能较为接近, 直接排放量和间接排放量均为各类能源中最低, 总量分别为  $30\text{gCO}_2/\text{kWh}$ 、 $75\text{gCO}_2/\text{kWh}$ 。水能的间接排放最高, 已接近天然气的直接排放水平。但从整体看, 核能、可再生能源要远优于化石能源的碳排放水平。

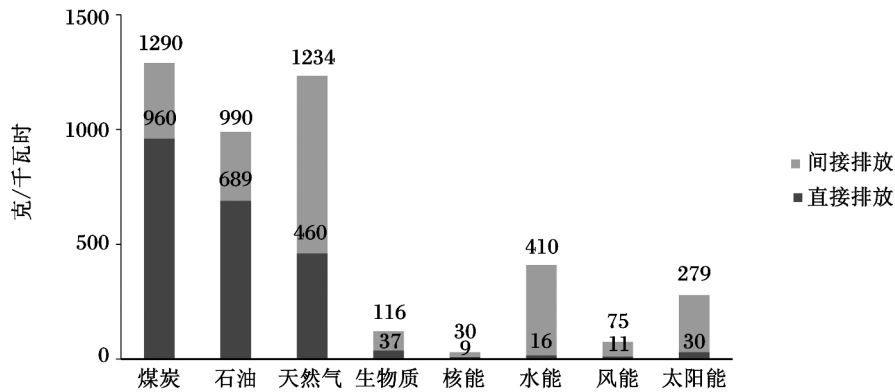


图 6: 全生命周期下各类能源的二氧化碳排放量

## 2. 太阳能的潜在风险与核能的高辐射污染

太阳能板包含一些不会随时间衰减的潜在危险材料。这些太阳能板主要的生产地在中国, 而不是其他太阳能发电国家, 因此, 中国的潜在问题值得深入评估与关注。然而, 即使在美国加利福尼亚州, 2007~2011 年间, 太阳能公司生产的危险废物约有 2 万吨 (McCombie & Jefferson, 2016)。最明显的例子之一是在制造薄膜太阳能电池板时使用镉, 元素镉毒性很大, 被列为世界六大污染问题之一。镉可以在植物体、动物体、人体内大量积累, 危害动植物和人类的健康, 甚至造成死亡, 镉对生命健康所造成的影响在很多医学案例中被提及。因此, 光伏产业的基础材料生产仍面临“高污染”的风险, 可能对生产国造成潜在而巨大的影响。

对于核电来说, 由于核燃料的能量密度非常高, 所以核电厂的废物数量比化石燃料发电厂少得多。但是, 可再生能源通常被认为是产生很少或没有废物的消费能源。核电产生的废物处理是核电厂高度重视的问题, 由于核裂变所产生的危险废弃物在以后的几千年里, 其毒性仍然是很高的, 而且世界上没有哪个地方能够安全地储存这些危险废弃物。基于此, 尽管核能发电具有较大优势, 很多反对核能的机构及组织 (如世界自然基金会, 简称 WWF) 认为, 核电发展的代价是极其高昂的。

## 3. 风电的生物多样性影响与水电的生态代价

风能造成大量鸟类及蝙蝠的死亡这一事实, 目前已存在较多案例, 这一影响会逐渐对生物多样性产生影响。鸟类是一个有趣的生物多样性指标, 其处于食物链的位置对单一扩张敏感, 比大多数其他群体更具流动性, 因此, 相对于哺乳动物和陆生昆虫更能反映环境质量。因此, 它们通常被认为是更广泛的生态系统健康的优良指标。有强有力的证据表明, 风力涡轮机是导致大量禽鸟死亡的原因, 随着塔的高度和叶片尖度的增加, 死亡率呈现增长趋势 (Wiser & Bolinger, 2015)。同样, 水电也会对周边的生态产生巨大影响, 天然河流是一个完整的生态系统, 由于利用水电而建设筑坝后, 阻断了原有河道的水流连续特性, 进而对河流上下游的形态、流域内的河湖、河口特性产生系列影响, 使原本依存于该流域的物种构成、生态环境发生重大变化。而在一个流域内, 各梯级的生态环境往往交叉影响, 水力发电会产生明显的生态问题累积效应, 进而造成不同程度的生态损失。目前, 为公众所熟知的案例是在法国西北部的圣马洛附近, 那里有一条河口穿过拉朗河, 有研究显示, “1963~1966 年间, 在工厂建设期间, 河口完全关闭导致原始物种几乎完全消失” (Rodier & Clare, 1992)。



## 五、结 论

鉴于现有研究仍未能从经济学视角全面系统地反映可再生能源发展面临的问题,本文在能源转型的背景下,详细探讨了可再生能源成为主导能源所面临的自身局限及与外部能源竞争的挑战。在自身局限上,突出表现为可再生能源发电的间歇性与即时性,如果储能技术未实现较大突破,可再生能源的发展仍将面临较大限制。在经济成本上,本文从能源投资回报率(EROI)、发电成本及原材料投入三个方面将核能与可再生能源进行比较,核能除了在耗水上与风能和太阳能相比不具优势外,其在EROI、发电成本及原材料投入上远优于可再生能源。在生态环境成本上,本文从全生命周期进行考察,核能在碳排放及生态影响上要优于可再生能源。尽管核电具有较大优势,但是,一方面,由于核废物中含有高毒性和长寿命的辐射物,将对公众健康造成长期威胁;另一方面,核泄漏问题一旦发生则损失巨大,因此,很多反对核能的机构及组织认为,核电发展的代价是极其高昂的。而可再生能源虽然从资源本身看是“取之不竭的”,但其生产过程要消耗其他原材料,特别是“稀土”资源,其经济成本需要在稀土资源生产国重新进行考量。

在与化石能源和核能的竞争上,可再生能源虽然取得了较大进展,但目前仍无法与核能及化石能源直面竞争,值得一提的是,本文计算的能源投入回报率(EROI),其低值水平不仅意味着能源质量的降低、能源生产成本的提高,更意味着供给经济系统净能源量的大幅度减少,这将会对未来经济的增长速度产生冲击。就可再生能源而言,虽然将成为经济增长的重要引擎,但其较低的EROI也在一定程度上意味着对经济增长的拉动作用可能有限,需要予以关注。当然,可再生能源的发展仍然拥有强大的技术提升空间与优势,本文的侧重点在于阐述可再生能源发展中被大众所忽视的局限及问题,以便在能源转型过程中尽量避免其所带来的负面影响,进而使可再生能源在优化经济结构、拉动经济增长的过程中发挥可持续的积极正向作用。

### 参考文献:

齐绍洲、李杨 2017 “可再生能源消费影响经济增长吗?——基于欧盟的实证研究”,《世界经济研究》2017 4: 106—119。

史丹 2016 “以能源转型促进低碳工业化发展”,《中国国情国力》2016 10: 6—8。

史丹、王蕾 2015 “能源革命及其对经济发展的作用”,《产业经济研究》2015 74(1): 1—8。

宋辉 2011 《我国可再生能源供给的市场特征与激励机制研究》,中国矿业大学博士学位论文。

郁建兴、王茵 2017 “光伏产业财政补贴政策的作用机制——基于两家光伏企业的案例研究”,《经济社会体制比较》2017 4: 127—138。

赵勇强 2017 “国际可再生能源发展与全球能源治理变革”,《宏观经济研究》2017 4: 43—54。

[英]萨布海斯·C. 巴塔查亚 2015 《能源经济学——概念、观点、市场与治理》,冯永昇、周亚敏译,北京:经济管理出版社。

Apergis, N. and Salim, R., 2015. “Renewable Energy Consumption and Unemployment: Evidence from a Sample of 80 Countries and Nonlinear Estimates.” *Applied Economics*. 47(52): 1—20.

Cleveland, C. J. et al., 1984. “Energy and the U. S. Economy: A Biophysical Perspective.” *Science*. 225(8): 890.

Edenhofer, O. et al., 2011. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Khan, M. I. et al., 2017. “2014 Oil Plunge: Causes and Impacts on Renewable Energy.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 68(1): 609—22.

MacKay, D., 2009. *Sustainable Energy – Without the Hot Air*. Cambridge: UIT Press.

Marques, A. C., Fuinhas, J. A. and Manso, J. R., 2010. “Motivation Driving Renewable Energy in European Countries: A Panel Data Approach.” *Energy Policy*. 38(11): 6877—85.

McCombie, C. and Jefferson, M., 2016. “Renewable and Nuclear Electricity: Comparison of Environmental Impacts.”

*Energy Policy*. 96(3): 758 – 69.

Moriarty, P. and Honnery, D., 2016. “Can Renewable Energy Power the Future?” *Energy Policy*. 93(6): 3 – 7.

Murphy, D. J. et al., 2011. “Order From Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels.” *Sustainability*. 3(10): 1888 – 907.

Rodier, M. and Clare, R., 1992. *Tidal Power: Trends and Developments*. London: Thomas Telford Press.

Sadorsky, P., 2009. “Renewable Energy Consumption, CO<sub>2</sub> Emissions and Oil Prices in G7 Countries.” *Energy Economics*. 31(3): 456 – 62.

Salim, R. A. and Rafiq, S., 2012. “Why Do Some Emerging Economies Proactively Accelerate the Adoption of Renewable Energy?” *Energy Economics*. 34(4): 1051 – 57.

Smil, V., 2010. *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*. Santa Barbara: Praeger Press.

Wiser, R. and Bolinger, M., 2015. “2014 Wind Technologies Market Report.” [www.osti.gov/bridge](http://www.osti.gov/bridge).

## National Energy Low – Carbon Transformation and Renewable Energy Development: Restricted Factors, Supply Characteristics and Comparison of Cost Competitiveness

Ma Limei, Shi Dan & Pei Qingbing

(China Center for Special Economic Zone Research, Shenzhen University, Shenzhen; Institute of Industrial Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing; Energy Research Institute, National Development and Reform Commission, Beijing)

**Abstract:** In the new round of industrial and technological revolution, the third round of energy transformation is quietly occurring, which has an important impact on the national energy system and economic development. The energy transformation for the country not only means energy – saving and emission – reduction, but more importantly, the new energy industry and low – carbon technology development will be an important engine of economic growth, and the country can reshape its global industrial competitiveness. This paper analyzes the supply characteristics and cost competitiveness of renewable energy from the perspective of economics, and compares its internal and external costs with other energy, especially nuclear energy. In the national energy transformation, according to the combination of economics and the physical characteristics of renewable energy itself, we interpret the economic opportunities for renewable energy development and its severe challenges.

**Key words:** Industrial Economy; Renewable Energy; Nuclear Energy; Energy Transformation; EROI

(责任编辑: 刘 英)