

技术—经济范式转换与可 再生能源产业技术创新

蔡跃洲,李 平

(中国社会科学院 数量经济与技术经济研究所,北京 100732)

摘 要:文章依托新熊彼特主义创新理论,梳理了工业革命以来的历次技术革命和技术—经济范式转换。在此基础上,对可再生能源技术可能带来的新技术革命和技术—经济范式转换进行深入分析,并探讨可再生能源产业技术创新的制约因素与应对措施。研究表明:(1)工业革命以来的5次技术—经济范式转换都是新旧技术体系竞争的结果。具备通用性、渗透性和网络性特征的关联技术领域同时出现激进式创新会引发技术革命,形成新的主导技术体系,支撑新一轮经济长周期。(2)新技术体系通常以能源动力技术为核心,涵盖原材料、交通运输、信息通讯等领域;技术—经济范式的转换率先表现为社会生产消费组织模式的深刻变化,并受资源禀赋、经济社会制度和思想文化等因素的影响。(3)可再生能源有望引发新的技术革命,并与关联技术群构成新技术体系。新技术体系已经对社会生产消费组织模式和技术—经济体系产生了重大影响,而资源禀赋、经济制度和社会能力等因素也有利于技术—经济范式的再次转换。(4)在产业层面,推动可再生能源技术创新是技术—经济范式再次转换的关键,需要结合激进式创新的技术属性和能源项目的行业特征,从降低成本和风险的角度采取相应扶持政策。

关键词:技术—经济范式;可再生能源;技术革命;技术体系;经济长周期

中图分类号:F062.3;F062.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9952(2014)08-0016-14

一、引 言

可再生能源在应对全球气候变化、保障能源供给安全方面的作用已得到广泛认同。^①21世纪以来,全球可再生能源呈迅猛发展势头。从行业投资来看,2004年至2011年间,全球可再生能源投资由395亿美元攀升至2 575亿美元,年均增长31%;其中,中国、巴西、美国及欧洲的年均增长率分别为57%、51%、32%和27%(Bloomberg New Energy Finance, 2012)。从研发投入来看,2001—2009年间,OECD国家可再生能源R&D投入由9.72亿美

收稿日期:2014-03-26

基金项目:中国社会科学院哲学社会科学创新工程项目“科技战略与科技政策研究和评价”、国家重点基础研究发展计划(2012CB955801);中国社会科学院重点课题“新能源产业技术创新研究”、国家社科基金重大项目(12AZD096)

作者简介:蔡跃洲(1975—),男,江西余江人,中国社会科学院数量经济与技术经济研究所研究员;

李 平(1959—),男,河南洛阳人,中国社会科学院数量经济与技术经济研究所所长,研究员,博士生导师。

①“可再生能源”、“新能源”以及“新可再生能源”之间存在细微区别。根据《中华人民共和国可再生能源法》、维基百科等的界定,可再生能源可以划分为“新可再生能源”和“传统可再生能源”两类。其中新可再生能源还包括海洋能、地热、小水电等;而传统可再生能源主要是直接燃烧的秸秆、薪柴、粪便以及大型水电。而新可再生能源与新能源之间也有所区别,后者包括的核能便不属于可再生能源。本文后续出现的“可再生能源”除特别注明外,均指代核能以外的新可再生能源。

元上升为 39.27 亿美元,年均增长 19.1%(OECD/IEA 数据库)。见图 1 和图 2。

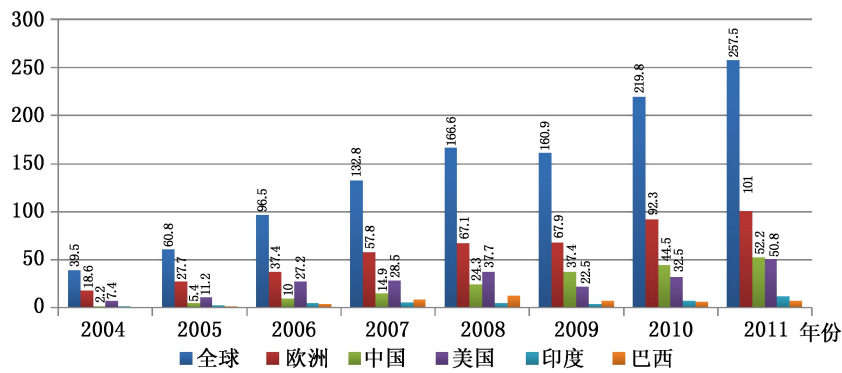


图 1 近年来全球可再生能源投资情况趋势图

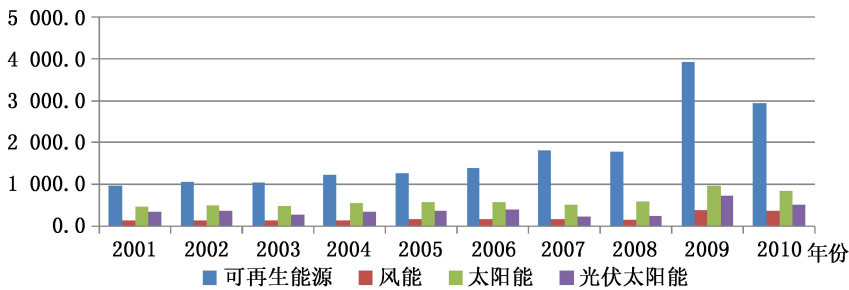


图 2 近年来 IEA/OECD 可再生能源 R&D 投入情况

尽管如此,可再生能源在一次能源供应中所占比重仍然很低;①未来可再生能源大规模应用也面临诸多挑战。第一,相比传统化石能源,可再生能源遵循着完全不同的新型技术路径,包括风能、光伏在内,在技术上都不够成熟,在成本上处于明显劣势,推广应用高度依赖政府的支持和补贴。第二,美国的页岩气产量由 2010 年的不足百亿方猛增至 2011 年的 1 800 亿方,“页岩气革命”似乎正在改变世界能源格局并有迟滞可再生能源技术创新步伐的势头。第三,在新贸易保护主义抬头背景下,可再生能源领域贸易争端不断,特别是 2011 年开始中国光伏产业遭遇的欧美“双反”调查和制裁,已对行业发展产生重大冲击。

面对上述现状,相关质疑也开始出现。可再生能源技术推广应用的成本是否过于高昂?中国可再生能源发展的步伐是否过快?页岩气是否应取代可再生能源成为未来新能源发展的主要方向?仅从短期成本收益来衡量,此类质疑有一定合理性。然而,从长期来看,推动可再生能源产业发展和技术创新的收益远不仅是应对气候变化和保障能源安全。可再生能源及其关联技术群有望引发新的技术革命,推动全社会技术—经济范式(techno-economic paradigm)转换;进而衍生新的产业价值链,改变宏观经济结构、创造就业岗位;最终促进新一轮经济长周期(康德拉季耶夫周期)的形成,成为未来宏观经济可持续发展的内在驱动。

①2010 年,所有可再生能源在全球一次能源供应中的比重仅为 13%,其中,中国、OECD 整体分别为 11.4%和 7.8%;而新可再生能源在全部可再生能源中的比重也较低,全球平均占比为 6.8%,中国、OECD 整体分别为 5.7%和 15%(IEA,2012)。

技术范式(technology paradigm)、技术—经济范式等相关概念是 20 世纪 80 年由多西、佩雷兹、弗里曼等创新经济学家率先提出的(Dosi, 1982; Perez, 1985; Freeman 和 Perez, 1988)。在佩雷兹看来,技术创新对经济的影响不仅局限于提高生产率,更体现为技术不断成熟和扩散过程中对技术体系(轨迹)、经济社会组织模式带来的影响;技术—经济范式正是在新技术推广应用实践中,原材料投入、生产工艺和技术、组织结构、商业模式、发展战略等多重因素相互磨合兼容,通过程序、流程和结构的完善,逐步消除各种障碍后所形成的一系列普遍遵循的隐性规则 and 标准(Perez, 1985 和 2010)。这些创新经济学家大多秉承了熊彼特有关创新和发展的基本思想,将技术创新看作是经济发展的内在驱动,并与经济周期密切相关(Schumpeter, 1934)。技术—经济范式方面的研究也大多与经济结构转化和经济长周期联系在一起。Perez(1985)从历史的视角首次提出了“技术—经济”和“社会—制度”的分析框架;并结合 20 世纪 80 年代微电子为核心的技术革命,对其可能带来的技术—经济范式转换和新一轮经济长周期进行展望。Freeman 和 Perez(1988)从技术—经济范式和经济周期的角度,探讨了 20 世纪 80 年代的结构性危机和投资行为。Freeman(1991)同样将技术—经济范式转换与熊彼特长周期理论联系在一起,并系统梳理了影响技术—经济范式转换的各种因素。Castellacci(2004)以 1890—1940 年、1940—1990 年这两个长周期中美国经济社会的特征和变化为例,分析了技术革命、技术—经济范式和社会—制度体系之间的关联,据此解释各国之间的增长差异。Perez(2010)则着重分析了技术革命与技术—经济范式转换之间的关系,并归纳了工业革命以来历次技术革命和技术—经济范式的主要特征。

与可再生能源技术创新相关的研究可以追溯到 20 世纪 90 年代。尽管当时可再生能源技术还很不成熟,但弗里曼等敏锐地意识到可再生能源技术对经济社会发展可能带来的革命性变化,并从技术创新体系演进和技术—经济范式转换等角度对可再生能源创新及绿色创新问题进行了前瞻性的探讨和展望。他们认为,包括可再生能源在内的绿色创新是复杂的非线性动态演进过程,会遭遇技术、经济和制度等多重障碍(Freeman, 1994 和 1996; Kemp 和 Soete, 1992; Martin, 1996)。进入 21 世纪后,随着可再生能源技术的逐渐成熟和推广应用,该领域的研究呈爆发式增长,但是大多数研究都是着眼于可再生能源自身的技术进步和产业发展,很少从技术—经济范式转换和经济长周期的角度考察;直到近期,才由澳大利亚经济学家马休开展了这方面尝试(Mathew, 2013)。Mathew(2013)将工业革命以来经历的技术革命、技术—经济范式转换、经济长周期和金融泡沫(破灭)进行对比分析,从时间上寻找其内在的联系和规律,并推断可再生能源技术将引发新的技术革命和技术—经济范式转换。

已有研究对技术—经济范式及其转换讨论比较充分,但在“可再生能源是否能推动技术—经济范式的再次转换”上还有待深入研究。本文拟在相关研究基础上,探讨可再生能源产业技术创新可能引发的新一轮技术革命和技术—经济范式转换;分析推动可再生能源产业技术创新的障碍、策略及前景。后续具体安排是:第二部分在概念辨析基础上对工业革命以来的历次技术—经济范式转换进行梳理和分析,尝试寻找历次技术—经济转换背后的特征和规律;第三部分结合可再生能源及其关联技术特点,分析其可能孕育的新技术—经济范式及推动技术—经济范式转换的有利因素;第四部分探讨可再生能源技术创新所面临的障碍约束和应对策略;第五部分是总结性评论及政策建议。

二、工业革命以来的历次技术—经济范式转换

工业革命以来,人类社会经历了大约 5 次技术革命。每一次都深刻影响了生产生活组

织模式,形成特定的技术—经济范式;社会—制度体系(socio-institutional system)也对此做出适应性调整和变化。技术革命的发生通常根植于几项关联通用性技术(general purpose technologies, GPT)所构成的新主导技术群(technology cluster)及技术范式;新主导技术群会引发技术革命和技术—经济范式转换,并有望支撑新一轮经济长周期的形成。

(一)通用性技术、技术革命与技术—经济范式。在主流经济学理论中,技术通常被看做是一种特殊的要素,或者是特定的投入产出组合方式;而技术变化则是生产函数曲线(生产前沿面)的位移。^① 主流经济学中的技术变化(技术进步)描述的只是渐进式创新(incremental innovation)。根据创新经济学相关理论,技术是“一系列知识,包括直接与具体问题和装置相联系的‘实践性’知识,实践上可行但尚未实际应用的理论知识、专门技能、方法、过程、成功失败经验,以及实体的装置和设备(Dosi, 1982)”。技术创新(或技术变化)则分为渐进式创新和激进式创新(radical innovation)。前者只是既有技术体系下连续性的增量改进;而后者则遵循着与既有技术体系完全不同的技术轨迹(technological trajectory)并对应着新的技术范式。^② 渐进式创新能够提高生产率水平,但是经济社会结构并不会发生根本性变化,而且还存在投资收益递减。^③ 激进式创新的出现则可能改变产业格局和整个宏观经济结构,对经济社会组织模式带来重大冲击。

激进式创新的影响程度和范围最终还要取决于技术的通用性和渗透性。如果发生激进式创新的技术具有很强的专用性,那么其影响力往往只限于所涉及的专业领域,很难对更大范围的产业和经济格局产生实质性影响;如果发生激进式创新的技术具有很高的通用性,能够有效渗透到其他产业部门,那么很可能对经济社会带来颠覆性革命。^④ 通用性技术是指那些具有很大提升空间和多种用途,且最终能够被广泛应用并带来巨大溢出效应的技术(Lipsey 等, 2005)。综观工业革命以来的技术发展史,通用性技术领域出现的激进式创新,特别是多个相互关联的通用性技术领域同时出现的激进式创新,将逐渐形成相互依存的主导技术群和新技术体系,这通常也意味着技术革命的爆发(Dosi, 1982; Perez, 2010)。

新技术体系和技术革命的出现将开启巨大的创新空间,为经济增长提供强劲动力。在此过程中,基础设施、产业结构、生产方式、制度环境乃至思想文化氛围等都将发生适应性变化,以促进新技术扩散和生产率水平提升,并最终形成与之匹配的新技术—经济范式。

(二)历次技术—经济范式转换基本情况。18 世纪 60—70 年代,以“斯密顿水车”、“珍妮纺纱机”、“阿克莱特水力织布机”等为标志的第一次技术革命,开启了工业革命的序幕,机器生产代替手工劳动、工厂取代手工工场,加上运河运输系统的构建,社会生产方式发生彻底改变,并形成全新的技术—经济范式;18 世纪末到 19 世纪 30 年代,以“瓦特蒸汽机”广泛应用和“利物浦—曼彻斯特”铁路线开通为标志的第二次技术革命将人类社会带入到“蒸汽和铁路时代”,并形成相应的技术—经济范式;19 世纪 70 年代,以钢铁、电力及重型机械等

① 在新古典生产函数中,技术和资本、劳动等一样都是不可或缺的组成部分,因此技术在某种意义上讲就是一种要素。

② 根据 Dosi(1982),技术范式是以自然科学和工程技术总结出的特定原理为基础所形成的解决特定类型技术问题的模式或方式;技术轨迹则是既定技术范式框架下解决技术难题、实现技术进步的正常方式,其边界由技术范式的本质所决定。每种技术轨迹下的技术进步都具有累积性特征;如果技术轨迹非常强大,那么转向其他替代轨迹将面临很大困难。

③ 即所谓的沃尔夫法则(Wolff's law),见 Freeman(1982)、Castellacci(2004)。

④ 如能源、材料等行业,对国民经济各部门有着很高的渗透性,这些领域发生的激进式创新,其影响将是非常深远的;如果是诸如某个专用机械的设计或加工工艺发生激进式创新,那么其影响将很可能仅限于该专用设备领域本身。

为代表的第三次技术革命将人类社会带入到“钢铁和电气时代”；20 世纪初，以石油化学、汽车制造、大规模生产为代表的第四次技术革命开启了“石油与汽车时代”；20 世纪 60—70 年代，以英特尔公司微处理器发布为标志的第五次技术革命宣告了“信息时代”的到来(Freeman, 2002; Perez, 2010; Mathew, 2013)。

从经济周期的角度来看，上述 5 次技术革命及技术—经济范式转换与新一轮长周期(康德拉季耶夫周期)的开始在时间上存在着耦合。通常，新技术革命的标志性事件会在上一轮长周期的下降期出现，比新一轮长周期的形成提前 10—20 年；到新技术体系成型时，经济开始进入新一轮长周期的上升期；而且，技术革命出现的时间间隔也大致在 50 年左右(Kondratiev, 1935; Schumpeter, 1939; Mathew, 2013)。在熊彼特及其追随者看来，上述时间上的耦合绝非偶然，正是技术革命的出现为新一轮经济长周期的形成提供了内在驱动；毕竟技术创新本质上是生产要素脱离既有循环流动(circular flow)实现重新组合，而以激进式创新为特征的技术革命则为全社会范围内的生产要素重新组合提供了巨大空间，并最终表现为经济发展(Schumpeter, 1934; Schumpeter, 1939; Perez, 1985; Perez, 2010)。见表 1。

表 1 历次经济长周期与技术革命耦合对照一览表

	历次长周期	历次技术革命	
		标志性事件	主导技术体系
1	上升期:1786—1813 年 下降期:1814—1842 年	1771 年阿克莱特水力织机;斯密顿水车等。	以机械、水力、运河体系等为核心,机械替代手工,并引发“工业革命”。
2	上升期:1843—1872 年 下降期:1873—1892 年	1829 年利物浦—曼彻斯特铁路试验线通车。	以蒸汽机、煤炭、铁路、电报为核心的技术体系,开启“蒸汽与铁路时代”。
3	上升期:1893—1910 年 下降期:1910—1940 年	1875 年卡内基转炉钢厂在匹兹堡建成。	以钢铁、电力、电机、电话等构成的技术体系,开启“钢铁与电气时代”。
4	上升期:1940—1970 年 下降期:1970—1990 年	1908 年第一台福特 T 型车从底特律工厂下线。	以石油、石化、内燃机、汽车等为核心的技术体系,开启“石油与汽车时代”。
5	上升期:1990—2000 年 下降期:2000—2020 年	1971 年英特尔公司发布第一款微处理器。	以微电子、计算机、信息通信等技术为核心,开启“信息时代”。
6	上升期:2020? —?	21 世纪初可再生能源的商业化应用?	以可再生能源、智能电网、新材料、节能环保等为核心,开启“绿色时代”?

注:综合 Kondratiev(1935)、Schumpeter(1939)、Perez(1985 和 2010)、Lipsey 等(2005)、Mathew(2013)等文献而得。

(三)技术—经济范式转换的影响因素。技术—经济范式转换是新技术体系与传统技术体系竞争的结果，是一项复杂的系统工程。影响技术—经济范式转换的因素除技术外更涉及经济、社会和制度等。在竞争初期，既有技术—经济范式的各种建成环境/人造环境(built environment)、制度环境^①通常更有利于既有技术体系(Freeman, 1991; Perez, 2010)。随着因素之间的相互适应、不断磨合和共同演化，新技术体系将逐步成为主导技术体系并形成与之相匹配的新技术—经济范式。^②

第一，若干通用性技术领域先后出现激进式创新并逐步形成新的主导技术体系，新技术

①Freeman(1991)将技术面临的社会选择环境分为三类，即自然环境、建成环境(或称“人造环境”)和制度环境。其中，城市、电站、交通设施、工厂和农场等各种固定资本，构成所谓“建成环境”。

②尽管本文将工业革命以来的历史进程划分为 5 次技术革命、技术—经济范式转换和经济长周期，但就某项具体的激进式创新、社会生产组织模式和社会制度方面而言，它们出现或形成的时间与表 1 中划分的 5 个时间段并不一定完全吻合。特别是生产组织模式、社会制度，由于其延续性特征很难将其绝对地划归于某次技术—经济范式的专属模式或制度。

体系中的相关技术具有高渗透性和网络性特征,且相互之间有着密切关联。^①以第三次技术革命及技术—经济转换为例,电力、内燃机等取代蒸汽机为经济社会运行提供新型能源动力;钢铁大规模生产技术的突破和应用为其他产业部门提供了充足的原材料;而电报、电话技术的应用则提供了全新的信息传递方式,突破了农耕文明时代信息交流存在的时空限制。电力、钢铁等相关技术能有效渗透到经济社会各个领域;电网、电话及更早形成的铁路系统有着显著的网络性特征;而技术体系内部相互之间存在的关联性也是不言而喻的。^②

第二,构成新技术体系的通用性技术通常都以能源动力技术为核心,并涵盖原材料、交通运输和信息通讯等领域。^③在历次技术—经济范式转换中,水车、蒸汽机、电力、电机和内燃机等技术先后在能源动力领域掀起了新的革命;钢铁、石油化工等方面的技术突破解决了社会生产所需的原材料问题;运河体系、铁路、高速公路、汽车和飞机等技术带来交通运输领域的革命;而电报、电话、无线电通信、计算机和互联网等技术的出现都是信息通讯领域的重大变革。

第三,在新的主导技术体系确立过程中,社会生产消费组织模式都会发生相应的变化和调整。例如,在第一次转换中,机器生产和分工协作取代了农耕时代手工劳动和自给自足;在第三次转换中,产品标准化、批量化生产成为工业领域的主流方向,大企业 R&D 实验室取代发明天才成为技术创新的主要力量,职业经理人成为独立群体;在第四次转换中,工业领域实现大规模和流水线生产,适应大众消费时代需求的大型超市和购物中心应运而生。

第四,技术—经济范式的成功转换还与经济社会制度以及思想文化等密切相关,而这些因素又取决于各国自身的客观条件。18 世纪的英国在科学方面落后于很多欧洲大陆国家,但产业革命和技术—经济范式转换却率先出现在英国,这与英国所具备的上述条件密不可分。当时,英国科学与技术之间的转化机制非常顺畅,包括牛顿力学在内的科学原理能广泛应用于各种工具、机器、引擎、运河、桥梁、水车等的发明和设计;自由市场的观念深入人心,亚当·斯密甚至被英国首相所尊崇为老师;此外,英国还率先建立起较为完善的资本市场准入和知识产权保护制度(Freeman, 2002)。而美国在第二次产业革命以及最近两次转换中能够占据先机,也得益于其社会—制度方面的优势。美国的创新体系中,大企业 R&D 实验室等制度安排,强化了科学与技术之间的联系,为激进式创新的商业应用创造了更好的条件;美国先进的金融体系和发达的金融市场又为新技术的推广应用提供了充足的资金(Castellacci, 2004);而清教徒节欲、勤俭的创业精神也培育出美国崇尚创新的社会文化氛围。

第五,资源禀赋条件也是影响技术—经济范式转换的重要因素。仍以 18 世纪的英国为例,英国北部地区奔宁山脉湍急的河流为斯密顿水车的使用提供了便利,当地的木材、煤炭及铁矿资源丰富,而兰开夏郡更有利物浦港口、技术工人等优势,这些都是新技术能够迅速在该地区扩散应用进而率先实现范式转换的重要原因。19 世纪末的美国同样有着实现范式转换的良好资源禀赋。当时的美国拥有丰富廉价的矿产资源、统一完备的巨大国内市场 and 高效完备的运输体系;而劳动力的相对短缺客观上有利于劳动节约型技术的推广应用。

① 本文的“通用性技术”概念借用自 Lipsey 等(2005),强调技术本身的通用性和渗透性特征。不过,在“通用性技术”的具体范围上,Lipsey 等(2005)明确列出了 24 项,电话、电报和钢铁冶炼等技术都未包括在内;而本文所指“通用性技术”相对宽泛,所有具有明显通用性和渗透性特征的激进式创新都在此范围内。

② 钢铁是电力、内燃机及铁路运输的原材料基础,电力和内燃机则为钢铁、通信和铁路运输提供了能源动力,而通信和铁路运输网络则为其他的部门生产销售活动提供了极大便利。

③ 在主导技术体系中,能源动力技术的核心地位是由其渗透性和通用性所决定的。能源动力是经济社会运转的物质基础,可以渗透到经济社会的每一个角落。从某种意义上来说,人类文明史上每一次重大进步,几乎都与能源动力革命有关。

三、可再生能源技术孕育的新技术—经济范式

从 2005 年左右开始,全球可再生能源投资迅猛增长,相关技术领域也取得重大突破。^①从技术角度来看,可再生能源与传统的化石能源遵循着不同的技术路线,可再生能源技术是能源动力领域典型的激进式创新。已有的 5 次技术—经济范式转换几乎都与能源动力领域的激进式创新有关(第 4 次除外)。而从经济长周期来看,如果以此次可再生能源领域的投资膨胀和技术突破作为新一轮技术革命的标志性事件,那么距离上一次技术革命标志性事件出现的时间间隔也接近 50 年。这意味着此轮新技术革命不仅将带来一次新的范式转换,还可能会在 2020 年左右成为开启新一轮经济长周期的内在驱动。当然,可再生能源技术最终能否推动范式的再次转换,还需要结合相关影响因素综合评判。其中,可再生能源技术能否引发一场新的技术革命并与关联的其他通用性技术形成新的主导技术体系至关重要。

(一)可再生能源技术有望引领新技术革命。技术革命本质上是人类社会的在摆脱各种外在束缚、获取更大程度生产生活便利方面取得根本性技术突破的一种变革。能源动力作为人类活动和社会运行的物质基础是制约经济社会发展的最主要约束之一,其影响力渗透到经济社会每一个环节和角落。因此,能源动力领域的激进式技术创新能够突破生产生活最基本的限制,从而引发全局性的技术革命。

工业革命以来,能源动力领域的激进式创新可以看做是旧的约束和限制不断被打破、新的约束和限制逐渐形成的循环轮回。斯密顿水车利用铸铁轮轴和铸铁传动装置使得水车达到产生和输送动力的极限,突破了人力、畜力在动力强度方面的限制,为珍妮纺纱机等复杂机械运转提供了持续强劲的动力;但是,要使用水车提供的动力,工厂选址就必须依河(溪流)而建。瓦特蒸汽机利用热能为机械提供了更为强劲而持续的动力,从而摆脱了使用斯密顿水车在地理位置、季节气候等方面的限制。当然,瓦特蒸汽机也存在诸多限制:一是随着功率的增加体积日益庞大,带来不便;二是结构复杂,热转化效率总体较低,经济成本较高;三是难以实现能量的远距离传输;四是仅限于热能与机械能之间的相互转化。而电力技术和内燃机技术带来的激进式创新恰恰克服了上述限制。无论是集中发电还是内燃机都具有更高的能源转化效率;电力技术配合电网,实现了能源的远距离传输,且具有在多种能源形式之间灵活转化的优势;内燃机体积小、功率大和燃料能源密度高等优势则能很好满足空间限制较大交通工具的动力需求。以电力技术和内燃机技术为主体的化石能源技术同样面临诸多的约束和限制,包括碳减排压力、资源枯竭和环境污染等;另外,“集中发电、统一配置”模式在电力供给方面存在较大系统性风险,而内燃机作为汽车动力也存在能量转化效率偏低的问题。

可再生能源技术是能源动力领域的又一次激进式创新,正好能够有效缓解化石能源技术面临的约束和限制。第一,可再生能源技术不消耗化石能源,能降低碳减排压力和资源枯竭的风险。第二,可再生能源大都属于清洁能源,能减少污染物排放。第三,“分布式发电+智能电网配置”的能源生产分配模式,能更好地保障能源供给安全,避免系统性风险。第四,新能源汽车替代燃油汽车能提高能量转化效率。随着可再生能源技术的不断成熟,能源动力领域面临的各种限制和约束有望再次得到突破,进而引发新的技术革命。见表 2。

^①2012 年,风电产业初步具备与常规能源相竞争实力;光伏发电成本大幅下降,晶硅电池商业转换效率最高达 22%。

表 2 能源动力领域历次激进式技术创新突破的限制与面临的约束

激进式技术创新	突破限制	面临约束
斯密顿水车	采用铸铁轮轴、铸铁传动装置,达到水车动力极限,为珍妮纺织机提供持续强劲动力。	工厂依河而建,受地理位置、季节气候影响。
瓦特蒸汽机	有效利用热能为机械提供持续强劲动力,摆脱了水车使用受到的自然条件限制,广泛应用于工业和交通运输。	体积庞大,结构复杂、热效率低,难以远距离传输,只限于热能与机械能的转化。
电力技术+电网	集中发电提高能源转化效率;实现远距离传输;多种能源形式之间能灵活转化,广泛应用与工业生产、交通运输和生活消费。	碳排放、资源枯竭、环境污染、系统性风险较大。
内燃机技术	体积小、热效率高和燃料能源密度高,适用于空间限制比较大的交通工具。	碳排放、资源枯竭、环境污染、能量转化效率偏低。
可再生能源技术 +智能电网 +新能源汽车	降低碳排放、减少资源耗费和污染排放、降低电力系统的系统性风险、提高交通运输过程中的能量转化效率。	

(二)可再生能源技术为核心的新技术体系。能源动力领域激进式创新对技术革命的引领作用源于其推广过程中能带动关联领域的技术突破;而关联领域的技术突破又会进一步增强能源动力领域的技术性能。例如,电力技术的出现带动了钢铁、材料、电报、电话等技术发展;内燃机技术带动了石油开采和炼化技术。

可再生能源技术的应用推广同样也会带动关联领域技术进步。高转换率的光伏电池板和高性能风机叶片都离不开新材料技术的支撑;分布式电力生产需要智能电网的高效配置,智能电网则必须融合电力、电子、信息通讯和物联网等技术;而风机及其制造设备、光伏电池板成套设备的生产又对先进制造技术提出了新要求。事实上,在可再生能源技术创新步伐加快过程中,新材料、智能电网、新能源汽车、新一代信息通信、先进制造等关联领域已经出现了突飞猛进的技术变化;而关联领域的技术突破又能进一步提升可再生能源技术性能。例如,纳米材料、纳米结构、薄膜技术等新材料技术的应用,大大提高了光伏太阳能电池的转换效率;^①复合材料技术、先进制造技术及控制技术在风电设备制造中的应用大大提升了风机技术性能,并降低其安装及运行成本;而智能电网将分布式计算和通信技术引入电网,有望通过实时信息交换实现设备层次的瞬时供需平衡,从而加快可再生能源技术的推广应用。

以可再生能源技术为核心,包括关联的新材料、智能电网、新能源汽车、新一代信息通讯和先进制造等在内的技术群正在形成新的技术体系。^②在新技术体系中,多数技术都具有很高的通用性和渗透性。这种特性决定了以可再生能源为核心的新技术体系不仅能够实现体系内的良性互动,而且将带动国民经济其他部门的技术进步。例如,新材料中的纳米技术将彻底改变传统材料的物理性能,为国民经济各部门技术和产品升级提供强大的物质基础;智能电网将带动电子电气、信息通讯、电动汽车等产业的发展;新一代信息通讯领域中物联网技术的突破拓展了即时信息交换的范围,已经能够实现人与物、物与物层面的信息无缝对接;先进制造领域中的增材制造(3D 打印),将信息、材料和控制等技术相互融合,大幅减少了从创意到产品之间的障碍,极大提高了加工制造的灵活性。新技术体系与以往历次技术革命中的主导技术体系具有很多相似之处,都以能源动力技术为核心,涵盖了原材料、交通和信息通讯等重要领域,并且具备网络性特征。因此,以可再生能源技术为核心的新技术体

^① 经国际标准测试机构确认的电池效率不断突破,其中薄膜转移硅电池效率达 19.1%,砷化镓薄膜电池达 28.1%。
^② 例如,光伏电池板转化率的提升和制造成本的降低都有赖于新材料领域的技术突破;智能电网与可再生能源之间则是典型的互补关系;而智能电网又离不开信息通信、新材料等相关技术的支撑。

系,完全有望形成新的主导技术体系,进而实现技术—经济范式的再次转换。

(三)新技术体系对技术—经济体系带来的冲击。尽管以可再生能源技术为核心的新技术体系尚未真正成为新的主导技术体系,但是新技术体系已经对社会生产消费组织模式和技术—经济体系产生了深刻的影响和冲击。这些影响和冲击已显现出新技术—经济范式的一些重要特征,具体来说主要体现在以下四方面。

一是分布式生产成为新的供给模式。通过大规模集中式生产实现规模经济、降低生产成本是工业文明的重要标志之一,也是工业时代生产力水平远高于农耕时代的重要原因。随着以可再生能源技术为核心的关联技术群的推广应用,很多领域重新出现了类似农耕时代的分布式生产模式。在能源动力领域,伴随可再生能源技术的推广应用,火电厂和水电站等大规模集中发电已不再是电力供给的唯一方式;以太阳能屋顶(立面)和小型风机等为代表的分布式发电成为新的供给方式。在制造业领域,3D 打印技术的出现也改变了大工业时代流水线集中批量的作业模式;分布在不同地点的 3D 打印店可以根据周边需求打印出客户所需产品,并以最快的速度 and 最低的运输成本配送至客户手中。当然,新技术体系下的分布式生产与农耕时代的分布式生产有着本质的区别。农耕时代的分布式生产是一种近乎自给自足的生产消费模式,经济主体间相互割裂,无法统一有效地配置社会资源;而新技术体系下的分布式生产背后则有着强大的网络信息技术支撑,可以更为高效地配置各种资源。

二是个性化需求得到更加充分的满足。在工业化推进过程中,随着技术复杂程度的提高、生产规模的扩大和生产工序的细化,生产过程中各环节的统一协调至关重要;而标准化制造则为降低协调成本、提高生产效率提供了便利。不过标准化产品整齐划一的特点在很大程度上也牺牲了消费者(或用户)的个性化需求。随着可再生能源技术为核心的新技术群的推广应用,生产和消费环节的个性化需求日益增加。例如,推广新能源技术过程中,建设光伏屋顶、安装小型风机等可能需要结合实际情况和客观条件定制个性化的设备或部件。当然,新技术体系中各关联技术,特别是 3D 打印等先进制造技术,能够大幅降低个性化定制的生产成本,为满足更大范围内的个性化需求创造了前提条件。在一些领域,作为大规模工业生产重要标志之一的标准化制造已逐步开始为个性化定制所取代。

三是经济社会运行的安全性稳定性增强。新技术体系下的生产消费组织模式中的分布式、个性化特征,有利于提高经济社会运行的安全性和稳定性。以能源供给安全为例,可再生能源技术的推广应用不仅能在宏观上解决化石能源耗尽后的能源供给来源问题,更能通过能源生产模式的变革提高电力系统整体的安全性和稳定性。传统集中供电模式下,单个电厂(乃至机组)的装机容量普遍很大,电网供给配置的调节能力也有较大局限,一旦某个环节出现故障,将产生很大的系统性风险,有时甚至是灾难性的后果。在 2003 年 8 月 14 日发生的北美大停电中,纽约、底特律、克利夫兰、渥太华、多伦多等多个北美重要城市约 5 000 万人口受到影响,直接经济损失高达 300 多亿美元。在可再生能源技术为核心的新技术体系下,由众多小容量、分布式可再生能源节点与智能电网组成的新型电力系统,将最大限度降低电力生产、配置各环节故障所带来的负面影响,提高电力供给的安全性和稳定性。

四是生产消费呈绿色低碳化趋势。在以可再生能源技术为核心的新技术体系下,生产活动和消费行为都将呈现绿色化、低碳化趋势。可再生能源本身就是绿色能源;智能电网技术的推广将实现能源供需的高效、优化配置,降低能源损耗;新能源汽车的推广能减少碳排放;新材料、先进制造等技术则可以提高各种原材料的利用效率,减少自然资源耗费。

(四)推动技术—经济范式转换的其他因素。以可再生能源技术为核心的新技术体系从技术

层面改变技术—经济体系的同时,一些其他因素也从不同方向推动着技术—经济范式的转换。

第一,资源环境的巨大压力倒逼技术—经济范式的再次转换。工业革命以来虽经历了5次技术—经济范式转换,但每种范式下的经济社会发展基本都建立在不可再生自然资源的大量耗费基础上。当前,包括中国在内的新兴经济体尚未完成工业化。如果延续欧美发达国家模式,在化石能源为基础的技术—经济范式下推进工业化,将面临资源枯竭、环境恶化和生态崩溃的危险。可再生能源及其关联技术群孕育的新技术—经济范式具有绿色、低碳和环保的特征;加快构建新技术体系,推动范式再次转换是实现可持续发展的必由之路。

第二,推动技术—经济范式转换是增强未来经济发展内在动力的客观需要。2008年爆发的全球性金融危机某种意义上是发达国家在既有技术—经济范式下创新动力衰竭的具体表现。根据熊彼特创新理论,经济发展的本质是要素打破原有循环的重新组合;而要素重新组合的过程也是技术—经济范式转换的过程。欧美发达经济体在以微电子、计算机通信等技术支撑下取得了巨大的经济成就,但支撑作用随着21世纪初网络泡沫的破灭而逐渐弱化,此后的房地产繁荣最终仍无法掩盖增长动力不足的现实。未来经济持续发展的长期动力还需要从技术创新方面进行挖掘。可再生能源及其关联技术群的出现恰恰能够打破既有的经济循环,实现要素重新组合和经济结构转换,并形成新的技术—经济范式。全球金融危机后,各国纷纷推出以可再生能源、智能电网、新材料和物联网等新兴技术领域为核心的振兴计划,很大程度上就是要推动技术—经济范式的再次转换以增强经济发展的内在动力。

第三,推动技术—经济范式再次转换所需的经济制度、社会能力和思想文化等条件已基本具备。在经济制度方面,各国金融体系,特别是风险投资体系日益成熟,知识产权保护制度不断完善,为加快包括可再生能源技术在内的各类激进式创新的推广应用奠定了良好的制度基础。在社会能力方面,发达国家和新兴经济体的中等教育普及程度普遍较高,高端人才跨国流动的限制逐步减少,各国对新兴技术的承接能力也因此而大幅提升。在思想文化方面,经过全球化和互联网的洗礼,多元包容、彰显个性、崇尚自由的理念被广为接受;以可再生能源技术为核心的新技术体系所具备的分布式、个性化特征也契合了上述理念。

四、可再生能源技术创新的制约因素及应对措施

技术—经济范式转换是新技术体系与经济社会制度环境不断磨合、试错和完善的长期演化过程(Perez,1985和2010);而具体到技术体系中的每一类新兴技术,要协调好相关主体因素,促进产业技术创新。可再生能源技术是新技术体系的核心,加快可再生能源产业技术创新自然也是实现范式转换的关键。当然,激进式创新创造性破坏的内在属性和能源项目高投资、长周期的行业特征决定了推动可再生能源产业技术创新面临诸多障碍和约束。

(一)制约可再生能源技术创新的主要因素。制约可再生能源技术创新的因素可以归结为“成本”和“风险”两个方面。可再生能源技术与化石能源技术存在直接的竞争关系。可再生能源技术创新的终极目标就是实现可再生能源技术的大规模商业化应用,不仅要有潜在的市场需求,更需要在财务上实现盈利或至少维持盈亏平衡。可再生能源作为传统化石能源的替代,潜在的市场需求并不缺乏;但由于技术还不够成熟,可再生能源在成本上与化石能源相比仍不具备竞争力(Isoard和Soria,2001)。未来成熟的可再生能源技术体系将对化石能源技术体系带来创造性毁灭;但在此之前,竞争性能源技术体系的任何进步都会扩大成本差距,并在客观上阻碍可再生能源技术创新。当然,任何不利于竞争性能源的因素又会促进可再生能源技术创新。

制约可再生能源技术创新的因素还包括“市场(接受)风险”、“运营管理风险”和“政府规制风险”等。市场风险除了来自既得利益部门(传统化石能源)的阻碍外,还来自公用电力事业部门对可再生能源技术所持有的保守主义倾向,如电网接入环节设置过多限制。运营管理风险的关联因素更多,如原材料上涨、运营成本增加和专业管理人才缺乏等;从欧洲的经验来看,合格的能源管理团队供给普遍不足。规制风险主要是由政府规制政策变化而带来的风险,是能源部门特有的风险。另外,对外部风险投资者来说还面临一个“退出风险”(Wüstenhagen 和 Teppo, 2006; Cleijne 和 Ruijgrok, 2004)。发展中国家存在技术及资金成本偏高、缺乏具备该领域专业知识的投资者、规模偏小导致项目交易成本较高等客观现实,上述风险和障碍更为突出(Couture 和 Gagnon, 2010)。诸多风险给可再生能源融资带来了很大障碍。虽然全球风险投资总额已具备相当规模,能源产业的整体规模也非常可观,但早期风险投资进入可再生能源领域的仅在 2%—5%(Wüstenhagen 和 Teppo, 2006)。

(二)推动可再生能源技术创新的应对措施。推动可再生能源技术创新关键在于降低可再生能源项目的成本和风险。由于技术成熟度方面的客观限制,在可再生能源技术推广应用的初期,降低成本和风险必须依靠各级政府的扶持政策。从欧美国家实践来看,可再生能源扶持政策大致可以分为三大类,即“上网电价(FIT)”、“可再生能源组合标准(Renewable portfolio standard, RPS)/可交易绿色证书(Tradable green certificates, TGC)”和“投资/生产税收抵扣(Investment Tax Credits, ITC; Production Tax Credit, PTC)”;其中,欧洲国家主要实施前两类政策,而税收抵扣政策主要是在美国实施(Fouquet 和 Johansson, 2008; Lipp, 2007; Wong, 2005; Jacobsson 和 Larber, 2006; Mendonca 等, 2009; Laird 和 Stefes, 2009)。见表 3。

虽然扶持政策都是通过降低可再生能源项目的私人成本和风险推动技术创新和产业发展,但三类政策在分担机制方面有着明显的差别。FIT 属于定价政策,能保证可再生能源发电企业以固定价格出售电力,从而有效地锁定可再生能源项目的成本和风险;不过作为一项严格的规制措施,FIT 实施成本过高,加重了消费者和纳税人的负担,且不鼓励自由竞争(Lipp, 2007; Laird 和 Stefes, 2009)。RPS/ TGC 是一种配额制度,要求电力供应商所提供电力中有一定比重来自可再生能源,而其价格和来源则交由市场决定,因此为自由市场支持者所推崇;但该政策框架很难为可再生能源电厂提供价格、合同期限等方面的任何确定信息,也无法对成本不同的多种技术路线提供支持(Lipp, 2007; Wong, 2005)。税收抵扣对可再生能源初期市场的培育非常重要,但是对进一步推动市场扩张并不适合。非现金返还的税收抵扣额度下,仅有少数大公司或富人有足够多的应缴税款从而享受到税收抵扣。这样,可再生能源项目的财务收益最终都落入少数主体手中(Mendonca 等, 2009)。

不同类型政策在推动可再生能源技术创新及产业发展方面的作用和效果存在较大差别。在专利申请和技术进步方面,政府扶持政策有着显著影响,但不同政策适用的技术类型有所不同。其中, FIT 等直接补助政策对推动太阳能等低成本可再生能源的技术进步作用显著; RPS/ TGC 等政策更有利于风能等最具成本竞争优势可再生能源的技术进步;而 ITC/ PTC 等税收政策则适用于多种可再生能源类型(Johnstone 等, 2008)。

从可再生能源技术应用推广的效果来看,不同类型政策也存在很大差距。丹麦、德国、西班牙、葡萄牙及其他实施 FIT 的欧盟国家取得了巨大成功。目前,德国、西班牙和丹麦在可再生能源领域早已成为世界领跑者,成功实现了设定的可再生能源渗透率及其他各项目标,特别是产业发展和就业创造;德国还在二氧化碳减排方面取得预期效果(Lipp, 2007;

Krajacic 等,2011)。相比之下,实施 RPS/TGC 政策的英国,可再生能源推广的成效则明显不足。尽管英国从 1990 年便开始实施可再生能源电力(RES-E)发展计划,但包括可再生能源发电比例、二氧化碳减排等在内的各项政策目标都未能取得预期效果(Lipp,2007; Wood 和 Dow,2011)。至于以 ITC/PTC 政策为主的美国,虽然早在 1970 年代石油危机后便开始实施了与德国相似的可再生能源发展政策,但最终的政策路径和成效却迥异;2000 年以后,德国可再生能源产业,不论是装机容量还是出口都明显好于美国(Laird 和 Stefes, 2009)。

表 3 不同类型可再生能源支持政策对比一览表

	FIT	RPS/TGC	ITC/PTC
优点	有效锁定成本风险,提供稳定预期。	充分发挥市场机制作用。	有利于可再生能源初期市场的培育。
缺点	成本过高,不鼓励自由竞争。	难以提供确定信息和稳定预期。	不适合推动市场扩张;收益落入少数主体,不公平。
典型国家	德国、西班牙、葡萄牙和丹麦(2000 年前)	英国	美国
政策效果	有利于推动高成本可再生能源的技术进步;可再生能源推广应用、碳减排等方面效果显著。	有利于最具成本竞争优势可再生能源的技术进步;可再生能源推广应用、碳减排等方面效果较差。	适用于推动多种类型可再生能源;可再生能源推广应用、碳减排等方面效果不如 FIT。

五、总结性评论与政策建议

前面各部分结合工业革命以来的 5 次技术革命,梳理了技术—经济范式转换的基本规律和主要影响因素。着重分析以可再生能源技术为核心的新技术体系背后孕育的新技术—经济范式,并就推动可再生能源产业技术创新进行探讨。据此,可以做出以下判断。

第一,工业革命以来大约经历了 5 次技术—经济范式转换,每一次转换都是新技术体系与传统技术体系竞争的结果。新技术体系的形成通常需要相互关联的多个通用性技术领域同时出现激进式创新,并引发技术革命。

第二,引发技术革命和技术—经济范式转换的新技术体系通常以能源动力技术为核心,涵盖原材料、交通运输和信息通讯等领域;相关新兴技术具有通用性、渗透性和网络性等特征,并对社会生产消费组织模式产生深刻影响。

第三,技术—经济范式的成功转换还与资源禀赋、经济社会制度以及思想文化等因素密切相关,而这些因素在一定程度上又取决于各国自身的客观条件。

第四,可再生能源技术有望引发新的技术革命,并与关联的新材料、智能电网、新能源汽车、新一代信息通讯和先进制造等技术群构成新的技术体系;新技术体系以能源动力领域为核心,涵盖了原材料、交通和信息通讯等重要领域,有望成为新的主导技术体系。

第五,随着可再生能源等新兴技术的推广应用,社会生产消费组织模式和技术—经济体系已经呈现出分布式、个性化、安全稳定和绿色低碳等新特征,勾勒出新技术—经济范式的初步框架;而资源禀赋、经济制度、社会能力和思想文化等因素也在推动范式的再次转换。

第六,可再生能源技术是新技术体系的核心,推动可再生能源技术创新也是实现技术—经济范式转换的关键。为此,需要结合激进式创新的技术属性和能源项目的行业特征,从降低成本和风险的角度采取相应的扶持政策。

参考文献:

[1]胡迪·利普森,梅尔芭·库曼. 3D 打印:从想象到现实[M]. 赛迪研究院专家组译,北京:中信出版社,2013.
[2]中国工程科技发展战略研究院.中国战略性新兴产业发展报告(2013)[C]. 北京:科学出版社,2012.

- [3]杰里米·里夫金.第三次工业革命:新经济模式如何改变世界[M]. 张体伟,孙豫宁译,北京:中信出版社,2012.
- [4]维克托·迈尔-舍恩伯格,肯尼思·库克耶.大数据时代:生活、工作与思维的大变革[M].盛杨燕,周涛译,杭州:浙江人民出版社,2013.
- [5]Castellacci F.A neo-schumpeterian approach to why growth rates differ[J].Revue économique,2004,55(6):1145—1169.
- [6]Couture T,Gagnon Y.An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment[J].Energy Policy,2010,38(2):955—965.
- [7]Dosi G.Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change[J]. Research Policy,1982,11(3):147—162.
- [8]Fouquet D,Johansson T.European renewable energy policy at crossroads-Focus on electricity support mechanisms[J].Energy Policy,2008,36(11):4079—4092.
- [9]Freeman C.Innovation,changes of techno-economic paradigm and biological analogies in economics[J].Revue économique,1991,42(2):211—232.
- [10]Freeman C.Continental, national and sub-national innovation systems-complementarity and economic growth[J].Research Policy,2002,31(2):191—211.
- [11]Stephane I, Antonio S. Technical change dynamics: Evidence from the emerging renewable energy technologies[J]. Energy Economics,2001,23(6):619—636.
- [12]Staffan J,Volkmar L.The politics and policy of energy system transformation: Explaining the German diffusion of renewable energy technology[J].Energy Policy,2006,34(3):256—276.
- [13]Johnstone N,Hascic I,Popp D.Renewable energy policies and technological innovation: Evidence based on patent counts[R].NBER Working Paper No. 13760,2008.
- [14]Kondratiev N D.The long waves in economic life[J]. Review of Economic Statistics,1935,17(6):105—115.
- [15]Krajacic G, Neven D, Antonis T, et al. Feed-in tariffs for promotion of energy storage technologies[J]. Energy Policy,2011,39(3):1410—1425.
- [16]Laird F N,Stefes C. The diverging paths of German and United States policies for renewable energy: Sources of difference[J]. Energy Policy,2009,37(7):2619—2629.
- [17]Langniß O,Diekmann J,Lehr U. Advanced mechanisms for the promotion of renewable energy: Models for the future evolution of the German renewable energy act[J].Energy Policy,2009,37(4):1289—1297.
- [18]Lipp J. Lessons for effective renewable electricity policy from Denmark, Germany and the United Kindom [J]. Energy Policy,2007,35(11):5481—5495.
- [19]Lipsey R G,Carlaw K I,Bekar C T. Economic transformations: General purpose technologies and long term economic growth[M]. London:Oxford University Press,2005.
- [20]Mathews J A.The renewable energies technology surge: A new techno-economic paradigm in the making? [R]. TTU Working Paper No.44,2012.
- [21]Mendonca M, Stephen L, Hvelplund F. Stability, participation and transparency in renewable energy policy: Lessons from Denmark and the United States[J].Policy and Society,2009,27(4):379—398.
- [22]Perez C. Microelectronics, long waves and world structural change: New perspectives for developing countries[J]. World Development,1985,13(3):441—463.
- [23]Perez C. Technological revolutions and techno-economic paradigm[J]. Cambridge Journal of Economics, 2010,34(1):185—202.
- [24]Schumpeter J.The theory of economic development[M]. Cambridge: Harvard University Press,1934.
- [25]Schumpeter J.Business cycles: A theoretical, historical and statistical analysis of the capitalist process[M]. New York, Toronto, London: MacGraw-Hill Book Company,1939.
- [26]Wong S.Obliging institutions and industry evolution: A comparative study of the German and UK wind

energy industries[J]. *Industry and Innovation*, 2005, 12(1): 117—145.

[27] Wood G, Dow S. What lessons have been learned in reforming the Renewables Obligation? An analysis of internal and external failures in UK renewable energy policy[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(5): 2228—2244.

[28] Wüstenhagen R, Teppo T. Do venture capitalists really invest in good industries? Risk-return perceptions and path dependence in the emerging European energy VC market[J]. *International Journal of Technology Management*, 2006, 34(1/2): 63—87.

Transformation of Techno-economic Paradigm and Technological Innovation of Renewable Energy Industries

CAI Yue-zhou, LI Ping

*(Institute of Quantitative & Technical Economics, Chinese
Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China)*

Abstract: Based on neo-Schumpeter innovation theory, this paper sorts out previous technological revolutions since the industrial revolution and the transformation of techno-economic paradigm. And it makes a deep analysis of new technological revolution and the transformation of techno-economic paradigm possibly resulting from renewable energy technology and discusses factors restricting technological innovation of renewable energy industries and countermeasures. It arrives at the following conclusions: firstly, five transformations of techno-economic paradigm are the results of the competition between new and old technological systems; in relevant technological fields featured by versatility, permeability and network, the simultaneous occurrence of radical innovation results in technological innovation, forms new dominant technological system and supports the new round of Kondratiev cycle; secondly, new technological system usually takes energy power technology as the core and covers fields such as raw material, transportation, information and communication; the transformation of techno-economic paradigm firstly would be reflected in profound changes in social production and consumption organization patterns, and be affected by factors such as resource endowments, economic and social institutions, and the tradition of ideas and culture; thirdly, renewable energy is expected to incur new technological revolution, and forms a new technological system with relevant technological clusters; the new technological system has had great impacts on social production and consumption organization patterns as well as techno-economic system; and factors such as resource endowments, economic institution, and social capability are beneficial to next transformation of techno-economic paradigm; fourthly, at industrial level, the advancement of technological innovation of renewable energy is the key to next transformation of techno-economic paradigm, and policies should be put forward to reduce costs and risk according to technological attributes of radical innovation and industrial characteristics of energy projects.

Key words: techno-economic paradigm; renewable energy; technological revolution; technological system; Kondratiev cycle

(责任编辑 许 柏)