

# 中国煤炭清洁燃烧技术路线图的初步探讨

岳光溪<sup>1,2</sup>, 周大力<sup>1,3</sup>, 田文龙<sup>1</sup>, 麻林巍<sup>1,3</sup>, 刘青<sup>1,2</sup>,  
章景皓<sup>1,3</sup>, 王志轩<sup>4</sup>, 龙辉<sup>5</sup>, 廖海燕<sup>6</sup>

(1. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 2. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;  
3. 清华大学国家电力系统重点实验室, 清华-BP 清洁能源研究与教育中心, 北京 100084; 4. 中国电力企业联合会,  
北京 100761; 5. 中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100120; 6. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京 100025)

**摘要:** 在防治污染的迫切要求下, 中国必须加快发展煤炭清洁燃烧技术, 但当前针对中国煤炭清洁燃烧技术路线图的研究还相对缺乏。本文对我国煤炭利用的结构特点、发展煤炭清洁燃烧技术的重要意义进行了概述, 并重点围绕六类煤炭清洁燃烧技术发展的战略思路和目标、国内外技术现状、未来技术方向、重点领域和关键技术等问题进行了初步探讨。在此基础上, 描绘了 2050 年前中国的煤炭清洁燃烧技术路线图, 并给出了相关战略建议。结果表明, 近期必须加快在中小型燃煤工业锅炉中应用一批新型循环流化床技术, 在民用散烧煤领域推广一批优质型煤和先进炉具, 切实减少分散式燃煤污染。从长远来看, 政府应加强规划引领, 切实提高煤炭用于清洁高效集中发电的比重, 并持续研发一批面向未来的绿色煤电技术和系统。  
**关键词:** 煤炭清洁燃烧; 技术路线图; 超超临界机组; 循环流化床; 污染控制  
**中图分类号:** TK0 **文献标识码:** A

## Preliminary Discussion on the Technology Roadmap of Clean Coal Combustion in China

Yue Guangxi<sup>1,2</sup>, Zhou Dali<sup>1,3</sup>, Tian Wenlong<sup>1</sup>, Ma Linwei<sup>1,3</sup>, Liu Qing<sup>1,2</sup>,  
Chong Chinhao<sup>1,3</sup>, Wang Zhixuan<sup>4</sup>, Long Hui<sup>5</sup>, Liao Haiyan<sup>6</sup>

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Power Systems, Tsinghua-BP Clean Energy Research & Education Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. China Electricity Council, Beijing 100761, China; 5. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100120, China; 6. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100025, China)

**Abstract:** As it is urgently required to prevent and control pollution, China must accelerate the development of clean coal combustion technologies. However, currently there lacks researches on the technology roadmap of clean coal combustion in China. This paper briefly introduces main features of the coal utilization structure in China, and also the significance in developing clean coal combustion technologies. Then, focusing on 6 types of clean coal combustion technologies, we discuss the strategic ideology and targets, status quo at home and abroad, future technical directions, major fields and key technologies. On this basis, we depict a technology roadmap for the clean coal combustion in China before 2050, and also provide relevant policy recommendations. Results indicate that in the near future, China must accelerate the application of new circulating fluidized bed (CFB) technologies in small and medium-sized coal-fired

收稿日期: 2018-04-25; 修回日期: 2018-05-11

通讯作者: 麻林巍, 清华大学能源与动力工程系, 副教授, 研究方向为能源系统分析与能源战略; E-mail: malinwei@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址: www.enginsci.cn

industrial boilers, and popularize a batch of high-quality briquettes and advanced stoves in the field of residential coal combustion, so as to reduce the dispersed coal-burning pollution. In the long run, the government must strengthen planning and guidance to increase the proportion of coal for clean and efficient centralized power generation, and continuously research and develop green coal power generation technologies and systems for the future.

**Keywords:** clean coal combustion; technology roadmap; ultra-supercritical unit; circulating fluidized bed; pollution control

## 一、前言

### (一) 中国煤炭利用的结构特点

按发电煤耗法计算,煤炭占2016年中国一次能源消费总量的62%和生产总量的69.8%。在美国、欧洲等许多发达国家,集中式大规模发电是煤炭利用的主导方式(主导意味着至少75%以上)。而中国煤炭利用的结构则更为多元化。如图1所示[1],2016年中国统计范围内的煤炭在最终去向上,仅58.4%用于集中的电、热生产(发电约52%,供热约6.4%);约33%用于工业及建筑业,包括工业锅炉、窑炉的直接燃烧利用(约17%)和作为钢铁生产原料为主的焦炭利用(约16%);其余约8.6%作为民用散烧煤,并以乡村生活消费为主。

总体上,燃烧利用还是中国煤炭利用的主导方式(超过80%)。但其中除了用于集中式大规模发电外,还有相当部分用于分散式工业、民用燃料。

### (二) 发展煤炭清洁燃烧技术的重要意义

从生态环保角度,国家层面有严格控制煤炭利用规模、持续降低煤炭在一次能源中占比的长远预期。例如,国家发展和改革委员会以及国家能源局提出2050年非化石能源占比超过一半[2]。戴彦德等[3]提出的重塑中国能源情景下,2050年非化石能源占比达55%,煤炭占比降至20.1%(按发电煤耗法计算)。在此背景下,当前严重的大气污染问题进一步催化了社会上的“去煤化”浪潮。

但考虑客观实际,必须意识到近中期煤炭仍是中国的主力能源。过激、过度的“去煤化”会严重影响到电、热等基本能源的供应保障和安全。根据我国国情,近中期要更努力地发展更清洁的煤炭燃烧技术。正如在2015年中央一季度经济工作会议上,习近平总书记就煤炭清洁利用发表讲话指出:“我们正在压缩煤炭比例,但国情还是以煤为主,在相当长的一段时间内,甚至从长远来讲,还是以

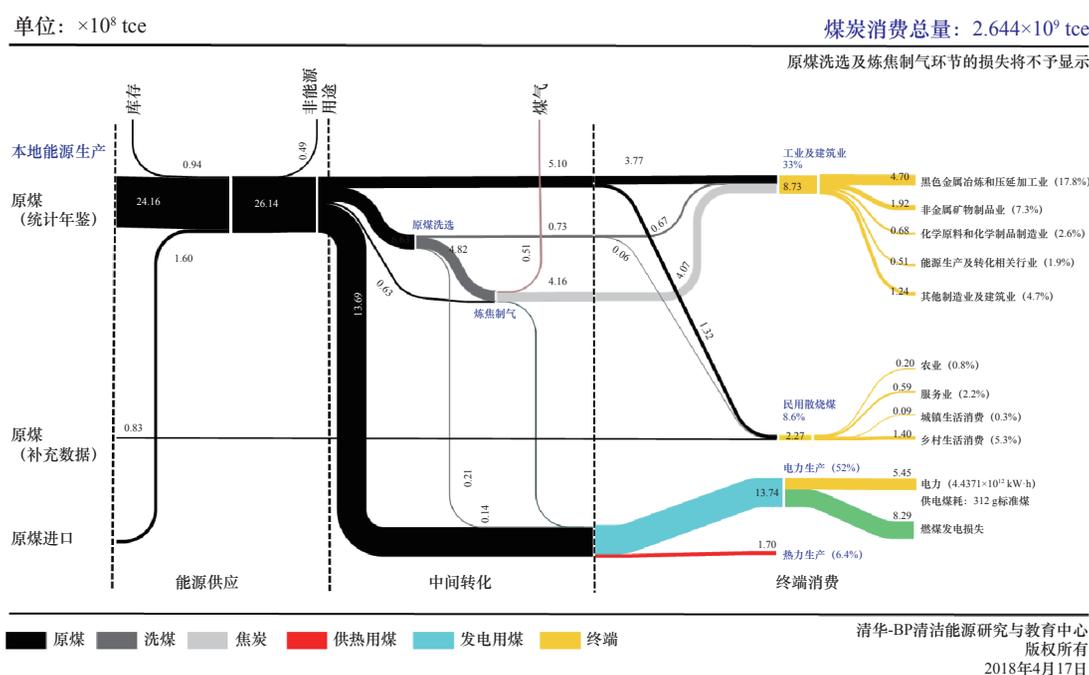


图1 2016年我国煤炭直接消费流向图

煤为主的格局，只不过比例会下降。我们对煤的注意力不要分散。而要考虑煤怎么用好，重点考虑利用新技术解决煤炭清洁燃烧问题”[4]。此外，中国工程院的推动能源生产和消费革命战略研究提出2050年煤炭占比控制在40%左右[5]，这也是主要从国家能源安全角度考虑的结果。

## 二、研究方法

技术路线图是国际上广泛采用的，支持战略规划发展与实现的工具[6]。近些年，技术路线图被广泛应用于公司战略[7]、科技创新[8]、能源规划[9]、城市建设[10]等领域。国际能源署2014年推出了技术路线图指南[11]，提出：路线图清楚地概述了任务之间的联系以及近期、中期和长期行动重点。一份完整的技术路线图包括目标、里程碑、差距和障碍、行动项目、优先事项和时间表等。中国与技术发展相关的五年规划和战略文本，也可认为是技术路线图的国情特色表述形式。一般包含现状问题、战略思路和目标、战略任务和保障措施等。

但目前，国内外关于煤炭清洁燃烧技术路线图的研究相对缺乏。2015年1月以来，围绕煤炭清洁燃烧的技术路线图问题，“煤炭清洁技术发展研究方向及发展路线图”课题（中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究项目”的课题6）组织了国内煤炭清洁燃烧领域的权威专家，进行了两年多（到2017年11月）的研讨，最终提出了如下关于战略思路和目标、国内外技术现状、未来技术方向、重点领域和关键技术的认识。

## 三、研究结果

### （一）战略思路和目标

发展煤炭清洁燃烧技术的战略思路和目标为：一方面要吸收国外的经验，尽量将煤炭集中到便于实现清洁燃烧的大规模发电领域。同时也必须考虑我国国情和国策，高度重视在中小容量燃煤装置中应用高效、清洁和低成本的技术。

这一方面是参考了欧美等发达国家煤炭主要用于大规模集中发电的经验，另一方面也是出于对国情国策的考虑：近年来煤电行业的环保努力已经对

大气污染减排做出了突出贡献，煤炭环保工作的焦点已经转移到了工业和民用燃煤上。

### （二）国内外技术现状

截至2016年10月，围绕六类煤炭清洁燃烧相关技术的国内外技术现状的调研结果为：

（1）燃煤工业锅炉：约85%为链条炉，平均单炉容量低，装备总体水平差，运行效率低，平均热效率仅为60%~65%，比国际先进水平低20%，并缺乏有效的污染物控制手段。

（2）民用散煤（一产、三产和生活部门）：比较而言，国内技术基础较为薄弱，甚至连民用散煤的统计数据都难以取得一致认识。

（3）超超临界技术：中国600℃一次再热机组的供电煤耗和供电效率已经世界领先；600℃二次再热机组全球约25台，中国已投运6台；650℃机组全球仅俄罗斯开发了1台SKR-100机组；700℃机组全球尚在研发，国内也已开展科研项目。

（4）煤电污染物控制技术：在大气污染物控制上，中国总体已经达到世界先进水平，有些方面甚至领先；在废水控制上与国外基本相当，但废水零排放尤其是脱硫废水零排放相对落后；在固体废物控制上，粉煤灰和脱硫石膏的大宗综合利用世界先进，但高附加值精细化利用相对落后。

（5）煤电深度节水技术：在褐煤取水方面，国内外均处于研发示范阶段。国内已在10个以上火电机组开展技术应用论证。在烟气水回收方面，冷凝水回收技术已在瑞典Karlskoga热电厂实际运行，国内有4台660MW超超临界机组开展工程设计。膜法水回收已在海外燃气电站实现商业化应用，国内仍处于研究阶段。

（6）碳捕获和封存/碳捕获、利用和封存（CCS/CCUS）技术：国际上大部分技术不同程度地处于理论研究、试验研究、工业示范和小范围商业性运作阶段，尚处于“特定条件下经济可行”阶段。国内在二氧化碳的运输管道建设上、化学链燃烧等前沿技术的基础研究上，与美国等发达国家相比还较为落后。

总体上看，中国在超超临界、煤电深度节水和煤电废物控制等技术领域已处于世界先进甚至领先的水平，虽然仍有部分技术和关键设备需要进一步研发或改进。与此同时，在燃煤工业锅炉、民用散

煤和 CCS/CCUS 等方面, 亟待缩小与国外技术发展的差距。

### (三) 未来技术方向

基于上述现状和技术需求, 现提出未来技术方向如下:

(1) 燃煤工业锅炉: 推动工业锅炉向大型化、智能化发展, 提高自动化水平。鼓励企业使用节能型低排放循环流化床锅炉、尾部烟气脱硫/除尘/脱氮一体化的链条炉等先进适用的清洁高效燃煤工业锅炉技术。与此同时, 通过以气代煤、以电代煤以及深度挖掘工业余热利用和废弃物循环等减少工业锅炉的燃煤量。

(2) 民用散煤: 深入推进优质煤/洁净型煤集约化生产、销售、使用。建立集中生产配送系统, 包括生产配煤中心、供应网络、农村配送体系、先进民用炉具供应平台等。推广民用解耦燃烧技术。与此同时, 因地制宜推进以气代煤、以电代煤和以可再生能源代煤。

(3) 超超临界技术: 继续发展完善和推广应用初参数为 600 °C /610 °C /620 °C, 单机容量为 1000 MW 级的二次再热超超临界机组; 加快研发和应用适用于 600 °C、二次再热超超临界燃煤机组的高低位错落布置技术; 尽快开展 650 °C 机组的研究和示范工作, 并及时推广应用; 开发 700 °C 机组耐热合金材料, 对 700 °C 机组的关键部件进行试验验证, 开发 700 °C 机组的主要设备和辅助设备, 争取建设 700 °C 超超临界机组示范工程, 全面掌握 700 °C 超超临界机组技术。

(4) 煤电污染物控制技术: 在废弃物控制上, 发展更高性能、更经济的新型污染物控制技术和多污染协同控制技术; 在废水控制上, 发展脱硫废水的“常规处理+预处理+蒸发结晶”技术; 在固体废物控制上, 发展利用脱硫石膏改良土壤(已成功改造 20 万亩)、高铝粉煤灰生产氧化铝等。发展脱硫石膏和粉煤灰的精细化利用, 生产高附加值产品。

(5) 煤电深度节水技术: 在空冷电厂广泛应用干除灰、干除渣、辅机空冷等成熟技术; 建设 600 MW 机组褐煤取水和烟气取水示范工程, 并推广应用。

(6) CCS/CCUS 技术: 继续开展捕获、利用技术的研发和示范; 尽快推进二氧化碳运输管道体系建设和区域源汇匹配的全流程工业示范。

### (四) 重点领域和关键技术

结合经济、社会发展趋势, 在上述方向中进一步凝练出的重点领域为: ①优化终端燃煤, 在控制工业锅炉和民用散煤的燃煤使用规模的基础上, 迅速提高燃煤工业锅炉的能效和排放性能, 大力提升民用散煤的煤质和利用水平; ②提高煤电效率, 以高效超超临界技术为主攻方向; ③煤电灵活调峰, 在保证锅炉燃烧效率的同时, 一定程度上解决电力调峰问题; ④发展绿色煤电, 实现煤电废气超低排放、废水近零排放、固体废物全部综合利用, 促进煤电深度节水, 推进煤电低碳化技术攻关。

围绕上述重点领域的关键技术包括: ①先进燃煤工业锅炉, 民用优质清洁煤炭和炉具; ②二次再热超超临界、汽轮发电机组新型布置技术、650 °C 及 700 °C 超超临界机组研发示范; ③热电解耦运行、电站运行优化技术; ④煤电深度节水、废气超低排放、废水零排放、固体废物大规模利用技术; ⑤二氧化碳管网建设和捕获/利用先进技术; ⑥加强系统集成, 探索近零碳排放、清洁高效、节约资源的全新一代煤电技术。

## 四、技术路线图

在上述认识基础上, 最终绘制的 2050 年前煤炭清洁燃烧技术路线图, 如图 2 所示。其核心是要围绕四大重点领域, 分阶段推进各类关键技术的科技攻关、示范推广和产业化。此外, 为在 2050 年前实现新一代绿色煤电技术的颠覆式创新, 从现在起就应加强围绕耦合 CCS/CCUS、可灵活调峰以及集成其他先进技术的近零碳排放、清洁高效、节水的新绿色煤电技术及系统的基础性研究。

## 五、实施建议

为促进技术路线图实施, 现提出五条战略建议:

(1) 加强宣传, 使全社会充分认识到煤炭对于我国能源安全的基础性作用。避免过度“去煤化”和“谈煤色变”可能带来的潜在重大风险。

(2) 规划引领, 切实提高煤炭用于集中发电和供热的比重。通过五年规划目标引导, 使煤炭用于集中发电和供热的比重 2030 年至少高于 65%, 2050 年

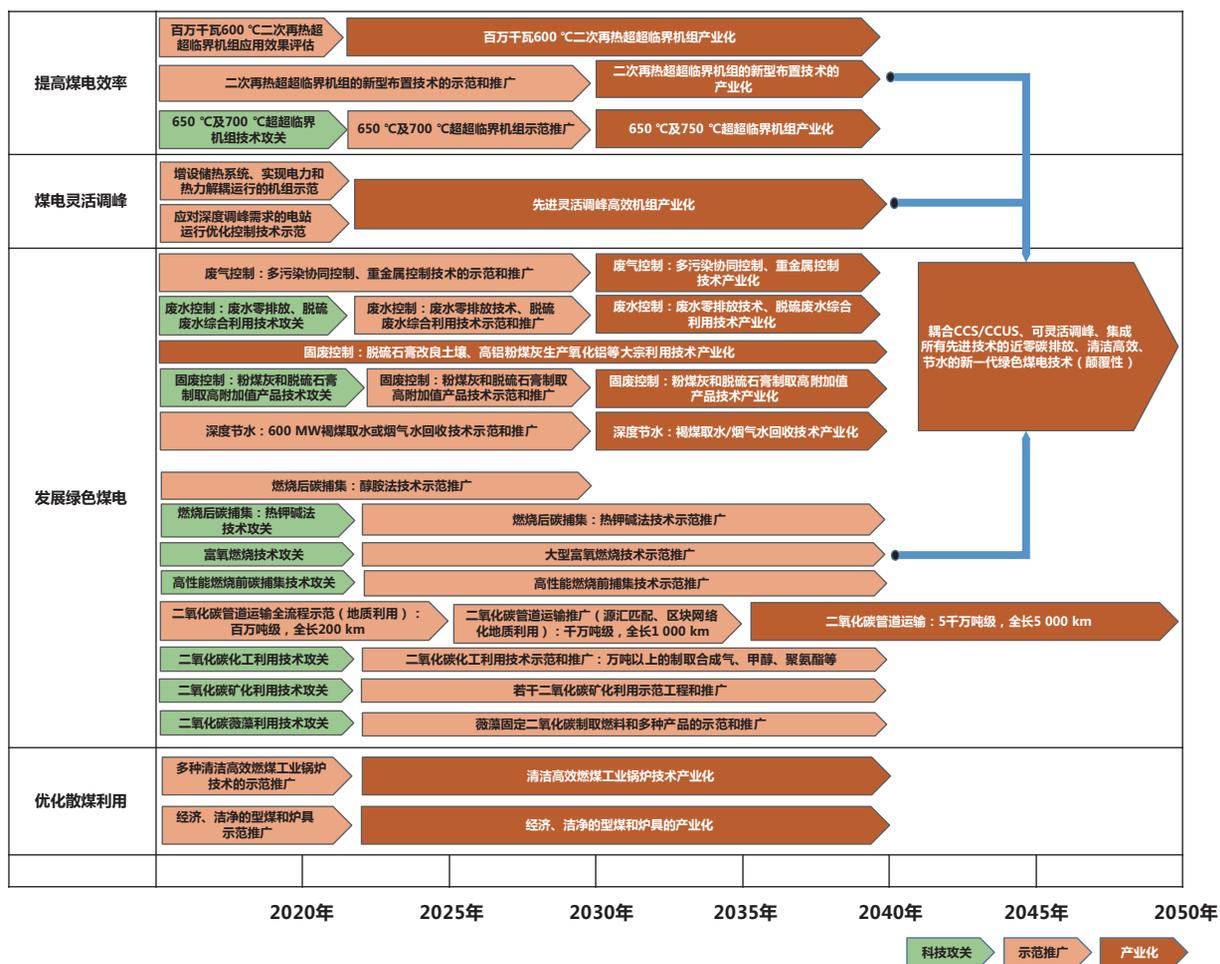


图 2 2050 年前煤炭清洁燃烧技术路线图

达到 75% 以上，从用煤结构上保障清洁化。

(3) 加快在中小型燃煤工业锅炉中应用一批新型循环流化床技术，从源头控制工业燃煤污染。通过相对简易的工程措施和无需改变煤种，实现低监管要求的、稳定可靠的燃煤工业锅炉清洁化（尤其是 100 t/h 以下规模）。

(4) 加快在民用散烧领域推广一批优质型煤和专用炉具，减少民用源的分散式污染排放。

(5) 重视基础研究，加快推进一批面向未来的绿色煤电技术颠覆式创新的国家重点研发专项。

## 六、结论和展望

本文对中国煤炭清洁燃烧技术的重要意义以及技术路线图相关的若干重要问题进行了初步探讨，提出了面向 2050 年前的煤炭清洁燃烧技术路线图以及促进技术路线图实施的五条战略建议。

总体来看，本文虽然对煤炭清洁燃烧技术路线图提出了相对系统的分析和建议。但考虑到中国能源长期发展和能源技术创新所面临的诸多不确定性，希望在今后研究中能够进一步发展完善和不断更新该技术路线图，以促进煤炭清洁燃烧技术的健康发展和可持续发展。

### 参考文献

- [1] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.  
Department of Energy Statistics in National Bureau of Statistics of the PRC. China energy statistical yearbook 2017 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于印发《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》的通知 [EB/OL]. (2016-12-29) [2018-03-16]. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/t20170425\\_845284.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/t20170425_845284.html).  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration of the PRC. The strategy of energy production and consumption revolution (2016—2030) [EB/OL]. (2016-12-

- 29) [2018-03-16]. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/t20170425\\_845284.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201704/t20170425_845284.html).
- [3] 戴彦德, 田智宇, 杨宏伟, 等. 重塑能源: 中国——面向2050年能源消费和生产革命路线图(综合卷) [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2017.  
Dai Y D, Tian Z Y, Yang H W, et al. Reshaping energy: China—A roadmap for energy consumption and production revolution up to 2050 (comprehensive volume) [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2017.
- [4] 谢克昌. 推动能源生产和消费革命战略研究(综合卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
Xie K C. Strategic research on promoting energy production and consumption (comprehensive volume) [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd. (CSPM), 2017.
- [5] 李新民. 神华欲引领中国煤炭业清洁转型 推出“1245”战略 [N/OL]. (2015-08-03) [2018-03-18]. 经济参考报, [http://www.xinhuanet.com/finance/2015-08/03/c\\_128086067.htm](http://www.xinhuanet.com/finance/2015-08/03/c_128086067.htm).  
Li X M. Shenhua wants to lead the clean transformation of China's coal industry and launch the “1245” strategy [N/OL]. (2015-08-03) [2018-03-18]. Economic Information Daily, [http://www.xinhuanet.com/finance/2015-08/03/c\\_128086067.htm](http://www.xinhuanet.com/finance/2015-08/03/c_128086067.htm).
- [6] Phaal R, Farrukh J R C, Prober D R. Technology roadmapping: A planning framework for evolution and revolution [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2004, 71(1-2): 5-26.
- [7] Jin G, Jeong Y, Yoon B. Technology-driven roadmaps for identifying new product/market opportunities: Use of text mining and quality function deployment [J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(1): 126-138.
- [8] Hao H, Cheng X, Liu Z W, et al. China's traction battery technology roadmap: Targets, impacts and concerns [J]. Energy Policy, 2017, 108: 355-358.
- [9] Amer M, Daim T U. Application of technology roadmaps for renewable energy sector [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2010, 77(8): 1355-1370.
- [10] Yasunaga Y, Watanabe M, Korenaga M. Application of technology roadmaps to governmental innovation policy for promoting technology convergence [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2009, 76(1): 61-79.
- [11] 国际能源署. 能源技术路线图制定和落实指南(2014年版) [R]. 巴黎: 国际能源署, 2014.  
International Energy Agency (IEA). Energy technology roadmaps: A guide to development and implementation (2014 edition) [R]. Paris: International Energy Agency (IEA), 2014.