

低碳发展论丛

沈满洪 / 主编

# 低碳能源论

李植斌 等 / 著

THE  
STUDIES OF  
LOW CARBON  
ENERGY

中国环境出版社



低碳发展论丛

沈满洪 / 主编

# 低碳能源论

李植斌 等 / 著

THE STUDIES OF  
LOW CARBON ENERGY

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

低碳能源论/李植斌等著. —北京: 中国环境出版社,  
2014.5

(低碳发展论丛)

ISBN 978-7-5111-2271-1

I. ①低… II. ①李… III. ①低碳—新能源—  
研究—中国 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 041445 号

出版人 王新程  
责任编辑 陈金华  
助理编辑 宾银平  
责任校对 尹芳  
封面设计 陈莹

---

出版发行 中国环境出版社  
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.com.cn>  
电子邮箱: [bjgl@cesp.com.cn](mailto:bjgl@cesp.com.cn)  
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)  
010-67113412 (教材图书出版中心)  
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司  
经 销 各地新华书店  
版 次 2015 年 5 月第 1 版  
印 次 2015 年 5 月第 1 次印刷  
开 本 787×960 1/16  
印 张 14  
字 数 258 千字  
定 价 45.00 元

---

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】  
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

## 《低碳发展论丛》编委会

---

策 划：浙江省哲学社会科学重点研究基地——浙江理工大学  
生态文明研究中心  
浙江省重点创新团队（文化创新类）——浙江理工大学  
生态经济研究团队

主 编：沈满洪

编 委：沈满洪 胡剑锋 程 华 李植斌 鲍健强 俞海山  
杨文培 彭 熠 陆根尧 战明华 周光迅 胡绍庆  
张海洋 魏 楚 魏 静 陈旭峰

资 助：浙江省高校人文社科重点研究基地——浙江理工大学  
应用经济学基地  
浙江省哲学社会科学重点研究基地——浙江理工大学  
生态文明研究中心

# 前 言

全球气候变化问题是人类迄今为止面临的规模最大、范围最广、影响最为深远的挑战之一。应对气候变化从根本上说来是如何发展的问题，而因发展造成的气候变暖实质上是能源选择问题。能源的低碳化对于解决环境问题、应对气候变化、优化能源结构、推进节能减排以及加快经济发展方式转变，都具有重要意义。

能源的低碳化主要包含洁净化利用化石能源、积极开发低碳能源、创新低碳能源技术、高效利用和节约利用能源等。本书在回顾我国能源发展、分析低碳能源与环境、经济关系的基础上，重点研究了高碳能源向低碳能源转型的机制、低碳能源发展战略、低碳能源发展路径选择、低碳能源开发、低碳能源利用及低碳能源发展体制、机制与政策等问题。全书共分为9章。

第1章 绪论。重点阐述了低碳能源研究背景、意义及国内外研究概况。

第2章 中国低碳能源的发展。回顾了我国能源发展历程，重点分析了低碳能源发展现状，探讨了低碳能源发展的必要性、低碳能源发展方向等问题。

第3章 低碳能源与环境、经济的关系。重点分析了低碳能源与环境的关系、低碳能源与经济增长的关系。

第4章 高碳能源向低碳能源转型机制。重点分析了我国能源低碳转型的机制，探讨了改革财税政策的作用机理、价格体系改革的作用机理、调整产业结构的作用机理、调整能源结构的作用机理及技术进步的作用机理等。

第5章 低碳能源发展战略。重点探讨了低碳能源战略思路与目标、低碳能源生产战略、低碳消费战略、低碳城市战略。

第6章 低碳能源发展的路径选择。重点探讨了能源生产低碳转型、能源消费低碳转型、低碳能源技术开发路径。

第7章 低碳能源开发。重点探讨了水能开发、风能开发、太阳能开发、生物质能开发、海洋能开发、地热能开发与氢能开发等问题。

第8章 低碳能源应用。主要从低碳建筑、低碳交通、低碳生活等方面探讨了低碳技术应用与低碳生活的倡导。

第9章 低碳能源发展的体制、机制与政策。主要探讨了低碳能源法律体系、低碳能源管理和监管体制构建，研究了低碳能源运行的市场机制，提出了低碳能源发展的政策建议。

本书执笔分工：第1章：李植斌、程众爱；第2章：张超；第3章：李植斌、张超；第4章：李植斌、苏庆凯；第5章：李植斌、田红彦；第6章：李植斌、林凯雯；第7章：曹丽君；第8章：李植斌、程众爱；第9章：李植斌、李鸣。



# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究综述.....	8
第 2 章 中国低碳能源的发展 .....	15
2.1 中国能源发展历程.....	15
2.2 中国低碳能源发展现状.....	20
2.3 低碳能源发展的必要性.....	22
2.4 低碳能源发展方向.....	24
第 3 章 低碳能源与环境、经济的关系 .....	30
3.1 低碳能源与环境的关系.....	30
3.2 低碳能源与经济增长的关系.....	33
第 4 章 高碳能源向低碳能源转型机制 .....	36
4.1 我国能源低碳转型的机制分析.....	36
4.2 改革财税政策的作用机理.....	39
4.3 价格体系改革的作用机理.....	41
4.4 调整产业结构的作用机理.....	45
4.5 调整能源结构的作用机理.....	45
4.6 技术进步的作用机理.....	46
第 5 章 低碳能源发展战略 .....	50
5.1 低碳能源战略思路与目标.....	50
5.2 低碳生产战略.....	52

5.3	低碳消费战略.....	55
5.4	低碳城市战略.....	59
<b>第 6 章</b>	<b>低碳能源发展的路径选择.....</b>	<b>62</b>
6.1	能源生产低碳转型路径.....	62
6.2	能源消费低碳转型路径.....	76
6.3	低碳能源技术开发路径.....	91
<b>第 7 章</b>	<b>低碳能源开发.....</b>	<b>100</b>
7.1	水能开发.....	100
7.2	风能开发.....	104
7.3	太阳能开发.....	108
7.4	生物质能开发.....	111
7.5	海洋能开发.....	114
7.6	地热能开发.....	117
7.7	氢能开发.....	119
<b>第 8 章</b>	<b>低碳能源应用.....</b>	<b>122</b>
8.1	低碳建筑.....	122
8.2	低碳交通.....	137
8.3	低碳生活.....	143
<b>第 9 章</b>	<b>低碳能源发展的体制、机制与政策.....</b>	<b>153</b>
9.1	低碳能源法律体系.....	153
9.2	低碳能源管理和监管体制.....	165
9.3	低碳能源运行的市场机制.....	174
9.4	低碳能源发展的政策建议.....	196
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>205</b>



# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 研究背景与意义

随着工业化、城市化进程加快，能源短缺及供需矛盾所导致的能源危机，以及能源开发和利用所造成的环境污染问题日趋严重，能源安全正引起全球各国政府、民众以及各领域工作者等的广泛关注。对于能源短缺问题，各界一直以来推崇开源节流，即开发利用新能源与节约、高效利用能源并重；对于环境污染问题，同样需要提高能源利用效率，通过减少能源消耗达到减少污染物排放的目的，同时必须优化现有能源结构，提高清洁能源的使用比重，并对传统能源进行清洁化处理。因此，低碳能源不单指新能源，也包括传统能源的清洁化、节能新技术的利用，更涉及传统生产方式、生活方式和消费方式的变革，是现代社会发展面临的一个重大课题。

#### 1.1.1 能源环境问题

能源环境问题主要表现在全球气候变暖，其根本原因在于温室气体的过度排放。大气中，温室气体主要有二氧化碳（ $\text{CO}_2$ ）、甲烷（ $\text{CH}_4$ ）、氧化亚氮（ $\text{N}_2\text{O}$ ）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟化碳（PFCs）、六氟化硫（ $\text{SF}_6$ ）等。其中二氧化碳对气候变化的影响最大，对温室效应的贡献率达 63%，它的寿命很长，一旦排放到大气中，其寿命可达 50~200 年，因此最受关注。而温室气体的来源主要是化石能源，其燃烧所释放的  $\text{CO}_2$  约占  $\text{CO}_2$  总排放量的 70%。所谓化石能源，是一部分辐射到地球上的太阳能储存到了古生物中，这些古生物的遗骸在地层下经过漫长的地质年代演变而成的能源，如煤是由植物化石转化而来的，石油是由动物体转化而来的。作为碳氢化合物或其衍生物，对化石能源的利用是造成环境变化和污染的关键因素。

### 1.1.1.1 温室效应的后果

从过去的情形来看，大气好像一个公共下水道，人类活动向其排放各种废气是自由的。但随着温室效应的不断加剧，人们开始意识到自身行为对环境造成的严重后果。未来百年之中，温度上升的幅度和速度可能是十万年来最明显的。

研究表明，大气中  $\text{CO}_2$  浓度增加 2 倍，会造成全球地面气温增加  $2\sim 4^\circ\text{C}$ ，尤其在高纬度与两极地区表现得更为明显：① 全球气温上升  $3^\circ\text{C}$  意味着气候体系中其他因子的剧烈变化，极端气候频繁，气象灾害加剧，一些地方雨量大增，而一些地方则转为干旱，使作物的生长环境恶化，生物多样性面临丧失；② 气温上升将会导致两极冰川融化，从而使海平面上升，海平面可能上升  $0.2\sim 1.4\text{ m}$ ，部分沿海陆地有可能被海水吞没，许多城市将不复存在，居住在海岸线  $60\text{ km}$  以内的、约占世界总人口  $1/3$  的居民将失去他们的家园，从而导致社会、经济及政治的动荡不安；③ 气温上升还会降低人体的抗病能力，若加上人口迁移、物种大迁徙，可能还会引发各种疫症的传播与蔓延，结果相当可怕。

### 1.1.1.2 国际社会应对温室效应的行动

各国对愈演愈烈的气候问题的关注并不是最近才开始的，1992 年 5 月在纽约联合国总部就通过了《联合国气候变化框架公约》（United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC 或 FCCC），6 月在巴西里约热内卢召开的世界各国政府首脑参加的联合国环境与发展会议期间开放签署，1994 年 3 月 21 日公开生效。该公约意在将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到认为危险的或干扰的水平上。这一水平应当在足以使生态系统能够自然地适应气候变化、确保粮食生产免受威胁并使经济发展能够可持续进行的时间范围内实现。

然而上述公约并未规定缔约方具体的义务，缺乏法律约束力。1997 年 12 月，在日本京都府京都市的国立京都国际会馆所召开的联合国气候变化框架公约三次会议上所制定的《京都议定书》（Kyoto Protocol，全称《联合国气候变化框架公约的京都议定书》），是《联合国气候变化框架公约》的补充条款，其意义在于为各国的  $\text{CO}_2$  排放量规定标准，即在 2008—2012 年，全球主要工业国家的工业  $\text{CO}_2$  排放量比 1990 年的排放量平均要低 5.2%，使温室气体减排成为发达国家的法律义务。另外，它构架了  $\text{CO}_2$  减排的国际合作机制，即温室气体减排的“三机制”：联合履行（Joint Implemented, JI）、清洁发展（Clean Development Mechanism, CDM）和“碳减排”贸易（Emission Trade, ET），使碳交易成为可能。

2007 年 12 月，在印度尼西亚巴厘岛召开的 2007 年联合国气候变化大会上，与会各国接受了“巴厘路线图”（Bali Road Map），为进一步落实《联合国气候变化框架公约》指明了方向，其亮点包括“共同但有区别的责任”原则；将美国纳

入《联合国气候变化框架公约》；强调了适应气候变化问题，技术开发、转让问题以及资金问题。

2009年，哥本哈根世界气候大会，即《联合国气候变化框架公约》第15次缔约方会议暨《京都议定书》第5次缔约方会议，商讨了《京都议定书》一期承诺到期后的后续方案，就2012—2020年的全球减排行为签署了新的协议，其焦点在于“责任共担”。

人类已经意识到传统能源的大量消耗会对环境造成恶劣影响，而最终影响到的则是人类的生存环境。因此，我们必须改变现有的能源消费结构，提高能源效率，减少高碳能源的使用，加快低碳、清洁、可再生能源的开发与利用，阻止能源环境污染问题的加剧。

### 1.1.2 能源短缺问题

随着能源的逐渐枯竭，我们会沦为“石油囚徒”，由此便会引发一系列的能源争夺战。因此，在情况还不算太糟的时候，我们必须行动起来，节约并高效利用现有能源，同时积极开发新能源，以满足人类发展的需要。

#### 1.1.2.1 世界、各国能源消耗情况

2011年，全球能源消费量增长2.5%，低于2010年的5.1%，且净增长全部来自新兴经济体，仅中国一国就贡献了71%的全球增长率，能源消费所导致的全球CO<sub>2</sub>排放量在2011年继续增长，但增速低于2010年。

2011年，全球煤炭消费达3 724.3 Mt油当量，中国是第一大消费国，其煤炭消费量占全球总消费量的比例高达49.4%，其次为美国（13.5%）；全年世界石油消费达4 059.1 Mt，其中美国消费833.6 Mt，约占总消费量的20.5%，中国消费461.8 Mt，约占消费总量的11.4%；全球天然气消费达32 229亿m<sup>3</sup>，其中美国消费21.5%，其次为俄罗斯（13.2%）。

表 1-1 2011 年世界各主要国家一次能源消耗量及占世界能源消耗总量的比重

国家	美国	英国	德国	日本	俄罗斯	中国	印度
消耗量（油当量）/Mt	2 269.3	198.2	306.4	477.6	685.6	2 613.2	559.1
比重/%	18.5	1.6	2.5	3.9	5.6	21.3	4.6

数据来源：BP公司 *Statistical Review of World Energy 2012*。

化石燃料依然是能源消费的主角，约占能源消费总量的87%，可再生能源的份额有所提高，但只占全球能源消费量的2%。而化石能源的消费结构也在发生变

化,全球石油消费增长 0.7%,达到 8 800 万桶<sup>①</sup>/d,涨幅为 60 万桶/d,其所占份额连续 12 年出现下降。天然气消费增长了 2.2%,中国增幅最大,达到 21.5%。煤炭则再次成为增长最快的化石燃料,消费增长 5.4%,约占全球能源消费总量的 30.3%,是 1969 年以来的最高份额,这对减碳目标的达成必定产生不利影响。

其他能源方面,由于干旱导致的欧洲和中国水力发电量下滑,全球水电增长仅 1.6%;全球核能发电量也因为日本海啸引发核泄漏事件的影响,日本核能发电下降了 44.3%,德国降低了 23.2%,使全球核能发电量下降了 4.3%;生物燃料生产出现停滞,增幅为 0.7%,相当于 1 万桶油当量/d;风力发电表现突出,增长了 25.8%,美国和中国是增长的主要贡献者;太阳能发电由于基数较小,其增速高达 86.3%。

表 1-2 2011 年世界各主要国家能源消费结构

单位: %

	原煤	原油	天然气	核能	水力发电	再生能源
美国	22.12	36.73	27.59	8.29	3.27	2.00
英国	15.54	36.13	36.43	7.87	0.66	3.37
德国	25.33	36.39	21.31	7.96	1.44	7.57
日本	24.64	42.17	19.89	7.73	4.02	1.55
俄罗斯	13.26	19.84	55.73	5.72	5.44	0.01
中国	70.39	17.67	4.50	0.75	6.01	0.68
印度	52.87	29.03	9.84	1.31	5.33	1.62

数据来源: BP 公司 *Statistical Review of World Energy 2012*。

#### 1.1.2.2 各种化石能源的存量及可使用年限

2011 年,世界石油的日产量为 8 357.6 万桶,同比增长 1.3%,OPEC 组织的原油产量占了世界原油总产量的将近 42.4%,单个国家中以沙特阿拉伯最高,原油产量占世界原油产量的 13.2%左右,其次是俄罗斯,美国占第三位。而石油的日消费量约 8 800 万桶,同比增长 0.7%,美国约占 20.5%,其次是中国,约为 11.4%。天然气生产方面,北美洲和欧洲及欧亚大陆两地的天然气生产量占 2011 年世界生产总量 32 762 亿 m<sup>3</sup> 的 58.1%,单个国家中天然气产量最高的是美国,俄罗斯位居第二。2012 年,世界煤炭的生产量为 3 955.5 Mt 油当量,中国约占 49.5%、美国约占 14.1%,加上印度、澳大利亚、俄罗斯,以上五国煤炭生产量约占世界的 80%。

① 1 石油桶≈159 L。

然而煤、石油等化石能源属于有限资源，终究会随着开发消费而枯竭。我们用储量来表示能源资源量，其又可分为“探明储量”和“可采储量”。前者是指油、气田里存在的原油、气的总量；后者则指原始储量中技术上合理、经济上可行的能够实现开采的储量。我们通常所说的“储量”或“探明储量”一般是指剩余可采储量，即可采储量与累计采出量之差。但剩余可采储量的多少不是固定的，会随着新油田的发现、技术的进步、采收率的提升、原油价格的提高等因素而提高。

不少学者都对传统化石能源的剩余可使用年限即储采比 ( $R/P$ ) 进行了预测。根据 BP 公司 2012 年的《世界能源统计年鉴》显示，截至 2011 年年底，全球石油的探明储量为 1.652 6 万亿桶，储采比约为 54.2 年，其中中东地区的石油探明储量约占世界总储量的 48.1%。天然气的剩余可采储量为 208.4 万亿  $\text{m}^3$ ，储采比为 63.6 年，其中中东地区拥有最大规模的天然气储量，约占世界天然气总储量的 38.4%。煤炭的剩余可采储量为 8 609.4 亿 t，可满足 112 年的全球生产需求，是化石燃料储存比最高的燃料。

考虑到储量会随着经济、技术等因素而变化，储采比也会随之变化，因此它只作为一个参考数据。即便如此，要维持现有的甚至更高的发展速度，仅仅依赖传统的能源是远远不够的，也是不可取的。我们必须加快低碳、清洁、可再生新能源的开发与利用，才能实现世界的可持续发展。

### 1.1.3 低碳能源

#### 1.1.3.1 低碳能源的定义

学界对低碳能源的定义没有明确的界定，有学者从微观角度指出，低碳能源是指含碳分子量少或无碳分子结构的能源。煤炭分子式中碳为 135、石油为 5~8、天然气为 1、氢能为 0，可再生能源基本为低碳或无碳能源。以此为标准，煤炭、石油、天然气等化石能源属于高碳能源，而水能、核能等非化石能源属于低碳能源。然而该定义仅从能源自身的含碳量作为界定标准，具有明显的片面性。例如，电能在其使用过程中是不产生  $\text{CO}_2$  的，但其是以煤为燃料，通过燃烧的方式实现能量转化而形成的，其生产过程伴随着大量  $\text{CO}_2$  的排放，因此不能简单判断电能是低碳能源。类似地，有学者认为低碳能源相对于高碳能源，其单位热值所含碳的数量少。热值相同的不同能源形式的  $\text{CO}_2$  排放量是不同的，以煤炭、石油、天然气这三种化石能源为例，煤炭的碳密度最高，石油次之，天然气的碳密度最低，因此，相对于煤炭和石油，天然气就属于低碳能源。但同样地，这一定义忽视了这样一个事实，即通过技术进步和能源效率的提高，碳含量高的能源在其使用过程中也可以实现低碳排放。另外，也有学者从广义上指出，低碳能源是顺从人类

发展方向、适应未来经济发展模式的一种可持续利用、既节能又减排的能源。作为清洁能源，低碳能源的突出特点是减少 CO<sub>2</sub> 排放对全球的污染，同时也兼顾了对社会性污染的减少。

综上所述，对低碳能源的界定要注意以下几点：① 从能源的使用过程来看，高碳能源也能通过清洁技术等低碳技术和先进的生产工艺所带来的高能源效率来实现减少 CO<sub>2</sub> 排放的目的；② 针对电能等二次能源，要将其从一次能源转化为二次能源的过程中产生的碳排放量计算到总的碳排放量中去；③ 低碳能源与高碳能源是一个相对的概念，其界定标准会随着社会的发展和技术的进步而变化，因此对某种能源属于高碳能源还是低碳能源，需要从多个方面进行衡量。

### 1.1.3.2 低碳能源的特征

低碳能源一般具有以下特征：

(1) 可再生、可持续应用。一般来说，低碳能源具有储量大、再生快等特点，能有效缓解煤炭、石油等化石能源逐渐枯竭的问题。

(2) 能源使用清洁化。所谓能源清洁利用，就是以更清洁、更环保的方式利用能源，具有明显的环境友好性，使用中几乎没有损害生态环境的污染物排放，有利于 CO<sub>2</sub> 及其他多种污染物的协同减排。

(3) 能源利用高效化。① 通过生产工艺的改进减少能源从开发到终端使用这一过程中不必要的浪费以及由此产生的 CO<sub>2</sub> 排放量的减少，提高能源转化效率；② 降低单位产出的能源消耗率，即减少生产单位产品或提供同质服务所需的能源投入，提高能源使用的经济效率，同样也能减少 CO<sub>2</sub> 的排放。

(4) 节能减排效果显著。低碳能源的节能减排效果体现能源从开发到终端利用的全生命周期中，该类能源在生产中所产生的碳排放及其有关设备的生产、维护所需要的物质消耗，远低于其所能产生的能量，且这些碳排放和物质消耗能在科技上给予减低和消除。另外，低碳能源密度较低，而且高度分散，具有很强的地域性，非常适合就地开发利用。虽然开发利用的技术难度较大，初期投资较高，但由于运行中不消耗化石燃料，因此运行成本低。

### 1.1.3.3 低碳能源的种类

能源按被利用程度、生产技术水平和经济效果等可分为常规能源（开发利用时间长、技术成熟、能大量生产并广泛使用）和新能源（开发利用较少或正在研究开发中）；按获得的方法可分为一次能源（自然界现实存在，可供直接利用）和二次能源（由一次能源直接或间接加工、转换而来）；按能否再生可分为可再生能源和非可再生能源；按对环境的污染情况可分为清洁能源和非清洁能源。

一般来说，低碳能源属于可再生的、清洁的、开发利用较少或正在研究开发

中的新能源,包括水能、风能、太阳能、核能、潮汐能、生物质能、地热能等。生物质能虽然不一定低碳,但作为地球循环的一部分,它不产生额外的碳,因此我们也将将其归类为低碳能源的一种。

水能是一种取之不尽、用之不竭、可再生的清洁能源,主要用于水力发电,具有发电效率高、成本低、对环境冲击小等优点。水能发电在技术上成熟,是最具大规模开发条件的非化石可再生能源。具备水能资源条件的发达国家,其水电平均开发度都在60%以上,其中日本已开发水电资源约84%。

与水能一样,风能也是一种可再生、无污染且储能巨大的能源,其以机械能转化为原理发电,不消耗化石燃料以及用于冷却的珍贵水资源,且不排放温室气体或有害的空气污染物,清洁又安全。丹麦是欧洲乃至世界上风力发电和热电联产发展最好的国家,2007年其风力发电量达到总发电量的19.4%。

太阳能是人类拥有的最丰富、最清洁、安全的可再生能源,对太阳能的利用主要包括太阳能发电和太阳能热利用。太阳能发电又称太阳能光伏发电,随着光伏产业的发展,太阳能发电将体现越来越重要的战略地位。在太阳能热利用方面,我国已成为太阳能热水器的最大生产国和消费国。德国在太阳能供热和光伏发电方面已走在世界前列,据德国太阳能协会(BSW)的统计,2007年德国利用太阳能供热 $658\text{ MW}_{\text{th}}$ ,占整个欧洲市场的34%;2008年,德国光伏发电装置为 $1\,500\text{ MW}_{\text{p}}$ ,其规模居世界第一位。

生物质能是太阳能以化学能形式贮存在生物质中的能量形式,即以生物质为载体的能量。它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用,可转化为常规的固态、液态和气态燃料。作为能源的生物质主要有植物及其废弃物,如秸秆、谷壳、能产生淀粉或糖类的玉米、甘蔗、甜菜等,水生藻类、油料植物、城市及工业有机废弃物、动物粪便等,其主要作用形式包括生物质能发电(包括生物质直接燃烧、气化和沼气发电)、制成纤维素燃料等。

地热能是由地壳抽取的天然热能,来自地球内部的熔岩,以热力形式存在,透过地下水的流动和熔岩涌至离地面 $1\sim 5\text{ km}$ 的地壳,热力得以被转送到较接近地面的地方。地热能可用于地热发电、建筑供暖、温泉旅游、农业温室种植等方面,美国是世界上利用地热发电最多的国家,总装机容量 $328.2\text{ 万 kW}$ ,是该国第三大可再生能源。菲律宾地热能发电在20世纪90年代末已占全国电力的30%,其装机容量现位居世界第二。

#### 1.1.3.4 低碳能源发展困境

如果这些低碳能源都能为我们充分利用,那么能源短缺和环境污染问题便能逐步得到解决,然而低碳能源发展所面临的技术、成本等难题,还亟待攻克。



科技进步是解决问题的关键，给予足够长的时间，各种技术都会发展成熟，然而时间正是我们所缺少的，我们必须追赶才能避免灾难的发生。低碳能源技术涵盖了可再生能源利用、新能源技术、化石能源高效利用、温室气体控制和处理及节能领域。例如洁净煤技术、光伏电池技术、电网安全稳定技术、深层地热工程化技术、温室气体捕集和埋存技术等。

另外，尽管太阳能具有资源量大和低碳的优点，但其成本比普通家庭用电费高出 1 倍多。理论和实践证明，环境价值与人均收入是高度相关的，公众对环境质量的评价与他们的收入高度相关。人均收入越高，公众才会越愿意为环境质量埋单。对比人均收入 2 000 美元的中国人和人均收入 40 000 美元的美国人，其支付意愿和支付能力相差甚远。因此，我们必须通过技术进步来降低低碳能源成本，实现规模化应用。

## 1.2 国内外研究综述

能源、环境、经济三大系统关系的研究主要集中在 3 个系统之间的综合平衡和协调、各系统之间交互作用关系和模型的研究，研究随着人们认识的提高逐步优化。最初，人们研究的内容主要集中在能源消费、经济增长和环境保护两两之间的因果关系。随着环境的恶化和主要资源（煤炭、石油等不可再生资源）的枯竭，能源、经济和环境协调发展的问题越来越受到重视，人们开始构建能源-环境-经济三元体系，并进行综合研究。

### 1.2.1 能源与经济的相关研究

19 世纪工业革命以来，依赖于能源的大量使用，世界工业化国家经济飞速增长。20 世纪 20 年代，前苏联最先开始研究能源经济问题，能源经济学由此诞生。而 1973 年世界能源危机的爆发，使能源与经济两元体系得到了发达国家的重视，并展开综合研究。

世界各国的经济增长证明，能源消耗量和能源消耗速度与国民经济生产总值及其增长率成正比，可用能源消费弹性系数来表示，即能源消费的年增长率与国民经济年增长率之间的比值。世界能源机构也表示，经济增长是能源需求最大的拉动力。但在分析经济增长和能源需求的关系时，有些学者认为应采用购买力平价（PPP）的方法把 GDP 转换成同一货币单位，因为这样更能全面地反映一国的生活成本。而有些学者则认为，应该采用 GDP 而不是 GNP，因为经济全球化加大了 GDP 与 GNP 之间的差距。

也有学者从经济活动、产业结构和能源强度的角度分析了能源消费的变化,如结构牵动论指出用能源供应结构及消费结构的双重优化配置,在不增加能源使用的前提下,实现国民经济的增长。这也符合能源经济学理论,即一个国家或地区的能源强度的变化会呈现库兹涅茨曲线,表现为在工业化初期,能源强度持续增加,达到峰值后开始下降。而此拐点一般是由于经济结构从能源密集型的重工业向以服务业为主转变,从而影响能源需求规模与能源结构。但每个国家出现拐点时对应的人均 GDP 有差异,这与各国的工业化进程和产业结构有关。

此外,有学者分析了 GDP 与能源消费总量以及与不同品种能源之间的相关关系。研究表明,GDP 与能源消费总量具有双向连锁关系,意味着在能源消费函数中包括上一期能源消费因素可以更好地解释下一期的能源,同样,在 GDP 函数中包括上一期的 GDP 也可以更好地解释 GDP。但是 GDP 与不同能源品种之间的关系则是有差别的,GDP 与煤炭、电力的关系是一致的,是双向连锁的,但是与石油和天然气消费则不是双向连锁的。

有些学者从低碳能源与经济增长的关系来研究,认为低碳能源促进经济增长,同时经济增长促进低碳能源的开发利用。郭四代(2012)从实证的角度对我国新能源利用和经济增长的关系进行研究,除验证了新能源与经济增长双向因果关系外,还得出新能源和传统矿物能源的消费均能促进我国经济的增长,但新能源对国内生产总值增长的贡献率大约是传统矿物质能源的 24.7 倍,大力发展和探索新能源并逐渐用新能源代替传统能源,是保持我国经济高速增长的有效途径。王军(2013)以四川省为例,运用计量经济学方法,研究新能源、传统能源和经济增长的关系,得出新能源的消费量对经济增长存在较为显著的单向 Granger 因果关系,但是在短期内四川省 GDP 的增长对新能源的消费量并没有显著的因果关系,新能源对经济增长的贡献比传统能源要高。

### 1.2.2 能源与环境的相关研究

能源的开发和利用会对生态和环境产生不同程度的影响,尤其是化石燃料能源的消费所产生的污染物和温室气体的排放,会造成大气污染和全球气候变暖。工业革命后,煤炭取代柴薪成为能源消费的主体,能源环境问题由此产生。

20 世纪 60 年代,美国经济学家钱纳里(H. Chenery)和斯特劳特(A. Strout)提出“两缺口”分析(Two-gap Approach),就引进外部资源的必要性、外部资源与区域经济发展的关系等做了系统的理论说明。从 20 世纪 70 年代开始,国内外学者开始普遍关注防治全球气候变暖和控制温室气体排放的问题,包括如何降低能源从生产到消费过程中产生的大气污染、酸雨和温室效应等环境问题,也包括