



太阳能利用系列丛书

太阳能光伏发电 应用技术 (第3版)

◆ 杨金焕 主编
◆ 袁 晓 季良俊 副主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

太阳能利用系列丛书

太阳能光伏发电应用技术

(第3版)

杨金焕 主编

袁 晓 季良俊 副主编

徐永邦 赵 为 于化丛 王士涛 徐 燕 参编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书的宗旨是在全面介绍光伏发电基本知识的基础上,着重于光伏发电系统的应用技术。第2版出版4年多来,无论是光伏技术还是光伏产业和应用都有了长足发展,现在光伏发电成本在一些地区已经可以和常规发电竞争。为了反映当前光伏发电应用技术的进展,本书在第2版的基础上,吐故纳新,比较全面地讲述了光伏发电系统的设计、制造、安装、维护等全过程,介绍了光伏发电系统应用新领域的发展情况,增添了太阳跟踪系统的内容,阐述了新型控制器和逆变器的功能及原理,增加了钙钛矿太阳电池等方面的内容,各章后面带有参考文献和练习题。

本书可作为有关研究机构 and 高等院校师生的教学参考用书,也可供太阳能光伏企业的管理和工程技术人员以及科技爱好者参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏发电应用技术 / 杨金焕主编. —3版. —北京:电子工业出版社,2017.10

(太阳能利用系列丛书)

ISBN 978-7-121-32779-7

I. ①太… II. ①杨… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第235272号

策划编辑:曲 昕

责任编辑:康 霞

印 刷:三河市兴达印务有限公司

装 订:三河市兴达印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19 字数:486.4千字

版 次:2009年1月第1版

2017年10月第3版

印 次:2017年10月第1次印刷

定 价:59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254468, quxin@phei.com.cn。

前 言

面对全球环境污染日益严重和化石燃料逐渐枯竭的危机局面，减少温室气体的排放，大力发展可再生能源，在能源消费领域走可持续发展道路，已经成为全球的共识。2015年12月，《联合国气候变化框架公约》近200个缔约方，在巴黎气候变化大会上一致同意通过的《巴黎协定》，已经在2016年11月4日生效，这体现了世界各国共同的决心。

作为可再生能源重要组成部分的太阳能光伏发电，近年来得到了迅速的发展。太阳电池的效率不断刷新纪录，新型太阳电池陆续涌现，配套部件的质量和性能持续提升，光伏组件产量屡创新高，价格大幅度下降，光伏应用领域在不断扩大，全球光伏发电系统累计安装量2015年已经达到228GW，同年光伏发电已经占全球发电总量的1.2%。在不少地区光伏发电的价格已经接近常规发电，可以预期，今后光伏发电在能源消费结构中所占的份额还将不断提高，据有关专家预测，到本世纪末将占主导地位。

近年来，我国的光伏产业规模迅速扩大，产业链主要环节市场占有率稳居全球首位，已经成为世界上重要的光伏大国，但无论是在制造还是应用技术等方面，与先进国家相比还有不少差距。科技发展日新月异，本书第2版问世4年来，无论是光伏产业还是光伏技术都有了较快的发展，原书有些内容已经陈旧过时，为了与时俱进，现进行修改补充，出版第3版。

本书仍是在全面介绍光伏发电基本知识的基础上，着重于光伏发电系统的应用技术，力求反映最新技术成果，如针对近年来光伏发电应用的新动向，增添了太阳跟踪系统的内容，阐述了新型控制器和逆变器的功能及原理，薄膜电池中增加了钙钛矿太阳电池等内容，比较全面地讲述了光伏发电系统的设计、制造、安装、维护等全过程，对常用的光伏发电系统设计软件并对其进行特点及适应范围进行了说明，还介绍了一些光伏发电系统应用新的领域发展情况。

本书由杨金焕修改了第2章、第10章和第11章，并负责全书统稿；袁晓修改了第1章、第3章和第6章，并协助全书统稿；季良俊进行审核定稿，并负责将全书翻译成英文；徐永邦修改了第8章和第9章；赵为修改了第7章；于化丛修改了第4章；王士涛修改了第5章；徐燕修改了全部练习题及图稿。

在本书编写过程中，得到了William A. Beckman、王斯成、王淑娟、董晓青、柳翠、顾华敏、陈祥、吴春秋、刘强、陈国良、张治等人的帮助，还有不少人对本书做出了多种形式的贡献，无法一一列举，谨在此一并表示感谢！

由于我们的学术水平和写作能力有限，错误和疏漏在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 开发利用太阳能的重要意义	(1)
1.1.1 化石燃料面临逐渐枯竭的危机局面	(1)
1.1.2 保护生态环境逐渐受到人们的重视	(4)
1.1.3 常规电网的局限性	(8)
1.2 太阳能发电的特点	(9)
1.2.1 太阳能发电的优点	(9)
1.2.2 太阳能发电的缺点	(10)
1.2.3 太阳能发电的类型	(10)
1.3 近年来世界光伏产业的发展状况	(11)
1.3.1 太阳能电池生产	(11)
1.3.2 光伏应用市场	(13)
1.4 中国光伏产业的发展	(15)
1.5 部分国家和国际组织发展光伏发电的规划和展望	(16)
1.5.1 日本	(16)
1.5.2 欧盟	(17)
1.5.3 国际光伏技术路线图 (ITRPV) 指导委员会	(19)
1.5.4 美国	(19)
1.5.5 中国	(20)
1.5.6 国际能源署 (IEA)	(21)
练习题	(24)
第 2 章 太阳辐射	(25)
2.1 太阳概况	(25)
2.2 日地运动	(27)
2.2.1 地球概况	(27)
2.2.2 真太阳时	(27)
2.2.3 日出和日落规律	(29)
2.3 天球坐标	(29)
2.3.1 赤道坐标系	(30)
2.3.2 地平坐标系	(31)
2.3.3 太阳角的计算	(32)
2.4 跟踪平面的角度	(35)
2.5 太阳辐射量	(37)
2.5.1 大气层外的太阳辐射	(37)

2.5.2	到达地表的太阳辐照度	(40)
2.5.3	地表倾斜面上的小时太阳辐照量	(44)
2.5.4	地表倾斜面上的月平均太阳辐照量	(47)
	练习题	(52)
第3章	晶体硅太阳能电池的基本原理	(53)
3.1	太阳能电池的分类	(53)
3.1.1	按照基体材料分类	(53)
3.1.2	按照电池结构分类	(55)
3.1.3	按用途分类	(55)
3.2	太阳能电池的工作原理	(56)
3.2.1	半导体	(56)
3.2.2	能带结构	(57)
3.2.3	本征半导体、掺杂半导体	(58)
3.2.4	N型和P型半导体	(59)
3.2.5	P-N结	(60)
3.2.6	光生伏特效应	(61)
3.2.7	太阳能电池光电转换原理	(62)
3.2.8	晶体硅太阳能电池的结构	(63)
3.3	太阳能电池的电学特性	(64)
3.3.1	标准测试条件	(64)
3.3.2	太阳能电池等效电路	(65)
3.3.3	太阳能电池的主要技术参数	(66)
3.3.4	影响太阳能电池转换效率的因素	(72)
	练习题	(76)
第4章	薄膜太阳能电池	(77)
4.1	概述	(77)
4.2	非晶硅太阳能电池	(78)
4.2.1	非晶硅太阳能电池发展简史	(78)
4.2.2	非晶硅电池结构	(79)
4.2.3	非晶硅薄膜电池的制造	(85)
4.2.4	非晶硅薄膜电池的产业化情况	(85)
4.3	碲化镉(CdTe)电池	(85)
4.3.1	CdTe材料与电池特点	(86)
4.3.2	CdTe电池的结构	(86)
4.3.3	CdTe薄膜太阳能电池的制造	(87)
4.3.4	CdTe薄膜电池产业化情况	(89)
4.4	铜铟镓硒太阳能电池	(90)
4.4.1	铜铟镓硒太阳能电池的特点	(90)
4.4.2	CIGS薄膜电池的结构	(91)

4.4.3	CIGS 薄膜电池的制造	(91)
4.4.4	CIGS 薄膜太阳能电池产业化情况	(94)
4.5	钙钛矿太阳电池	(96)
4.6	染料敏化太阳电池	(99)
4.7	有机半导体太阳电池	(101)
4.8	薄膜太阳电池市场及发展前景	(101)
	练习题	(103)
第 5 章	聚光与跟踪	(104)
5.1	聚光光伏发电	(104)
5.1.1	聚光光伏发电的优缺点	(104)
5.1.2	聚光光伏部件	(105)
5.1.3	聚光光伏系统	(113)
5.1.4	聚光光伏发电现状	(118)
5.2	太阳能跟踪系统	(119)
5.2.1	跟踪器的分类	(119)
5.2.2	跟踪系统的应用	(123)
	练习题	(126)
第 6 章	太阳电池的制造	(127)
6.1	硅材料制备	(127)
6.1.1	金属硅的制备	(127)
6.1.2	高纯多晶硅的制备	(128)
6.2	晶硅生长技术	(132)
6.2.1	单晶硅生长技术	(132)
6.2.2	铸造多晶法	(134)
6.2.3	铸造单晶法	(137)
6.3	晶硅加工技术	(138)
6.3.1	晶硅的切方	(138)
6.3.2	晶硅的切片	(139)
6.4	晶硅太阳电池制造技术	(139)
6.4.1	表面织构化	(139)
6.4.2	扩散制结	(142)
6.4.3	边缘隔离	(144)
6.4.4	去磷硅玻璃	(144)
6.4.5	沉积减反射膜	(144)
6.4.6	丝网印刷电极	(146)
6.4.7	高温烧结	(146)
6.4.8	太阳电池的 $I-V$ 特性测试	(147)
6.5	太阳电池组件的封装	(148)
6.5.1	太阳电池组件封装材料	(149)

6.5.2 太阳电池组件封装工序·····	(150)
练习题·····	(153)
第7章 光伏发电系统部件 ·····	(155)
7.1 光伏方阵·····	(155)
7.2 二极管·····	(156)
7.3 储能设备·····	(157)
7.3.1 主要储能技术·····	(157)
7.3.2 蓄电池·····	(162)
7.4 控制器·····	(168)
7.4.1 控制器的类型·····	(169)
7.4.2 控制器的主要功能·····	(170)
7.4.3 控制器的主要技术指标·····	(171)
7.5 光伏并网逆变器·····	(172)
练习题·····	(179)
第8章 光伏发电系统的设计 ·····	(180)
8.1 光伏发电系统的总体目标·····	(180)
8.2 并网光伏发电系统的设计·····	(181)
8.2.1 并网光伏发电系统的容量设计·····	(181)
8.2.2 并网光伏电站与电网的连接·····	(189)
8.2.3 并网光伏发电系统设计的基本流程·····	(194)
8.3 离网光伏发电系统设计·····	(197)
8.3.1 离网光伏发电系统优化设计总体要求·····	(197)
8.3.2 技术条件·····	(197)
8.3.3 光伏方阵倾角的选择·····	(200)
8.3.4 均衡性负载的光伏发电系统设计·····	(201)
8.3.5 季节性负载的光伏发电系统设计·····	(208)
8.3.6 特殊要求负载的光伏发电系统设计·····	(208)
8.4 光伏发电系统的硬件设计·····	(209)
8.4.1 站区布置·····	(209)
8.4.2 配电房及电气设计·····	(213)
8.4.3 辅助设备的选配·····	(214)
8.5 其他设计·····	(214)
练习题·····	(216)
第9章 光伏工程的施工、验收及维护 ·····	(218)
9.1 光伏发电系统的安装·····	(218)
9.1.1 系统安装前的准备·····	(218)
9.1.2 光伏方阵的安装·····	(219)
9.1.3 控制器和逆变器等电气设备的安装·····	(221)
9.1.4 蓄电池组的安装·····	(224)

9.2	光伏发电系统的调试	(225)
9.2.1	调试前的准备工作	(225)
9.2.2	光伏方阵调试	(225)
9.2.3	控制器调试	(226)
9.2.4	离网逆变器调试	(227)
9.2.5	并网逆变控制器的调试	(227)
9.3	光伏发电工程的验收	(231)
9.3.1	单位工程验收	(232)
9.3.2	工程启动验收	(232)
9.3.3	工程试运和移交生产验收	(233)
9.3.4	工程竣工验收	(233)
9.4	光伏发电系统的维护及管理	(233)
9.4.1	日常维护	(233)
9.4.2	定期检查	(234)
	练习题	(235)
第 10 章	光伏系统的应用	(236)
10.1	光伏系统的分类	(236)
10.1.1	微型光伏系统	(236)
10.1.2	离网户用系统	(238)
10.1.3	离网非户用系统	(239)
10.1.4	分布式并网系统	(249)
10.1.5	集中式并网系统	(259)
10.1.6	混合光伏系统	(262)
10.2	空间光伏电站	(263)
	练习题	(266)
第 11 章	光伏发电的效益分析	(267)
11.1	光伏发电的经济效益	(267)
11.1.1	光伏发电成本	(267)
11.1.2	光伏发电成本的历史及展望	(273)
11.2	光伏发电的能量偿还时间	(275)
11.2.1	能量偿还时间	(275)
11.2.2	国外情况分析综述	(276)
11.2.3	相关参数的计算方法	(281)
11.3	光伏发电减少 CO ₂ 排放量	(284)
11.3.1	发电排放的温室气体	(284)
11.3.2	CO ₂ 排放因子	(285)
11.3.3	光伏减排 CO ₂ 潜力	(287)
11.4	光伏发电其他效益	(289)
	练习题	(293)

第 1 章 绪 论

1.1 开发利用太阳能的重要意义

1.1.1 化石燃料面临逐渐枯竭的危机局面

随着世界人口的持续增长和经济的不断发展，对于能源供应的需求量日益增加，而在目前的能源消费结构中，主要依赖煤炭、石油和天然气等化石燃料。

美国能源信息署（Energy Information Administration, EIA）于 2016 年 5 月发表的 *International Energy Outlook 2016* 对 2040 年前的国际能源市场进行了预测，全球一次能源消费量在 2012 年为 $549(\times 10^{15}\text{Btu})$ ，2020 年将增加到 $629(\times 10^{15}\text{Btu})$ ，2040 年将达到 $815(\times 10^{15}\text{Btu})$ ，增幅达 48%，平均年增长率 1.4%。到 2040 年，全球化石能源在能源消费结构中所占份额将高于 3/4。根据报告附表 A1 参考情况统计和预测，世界部分国家和地区一次能源消费量如表 1-1 所示。

表 1-1 2011—2040 年部分国家和地区一次能源消费量 ($\times 10^{15}\text{Btu}$)

国家/地区	历史数据		预测数据					2012—2040 年 平均增长量 (%)
	2011	2012	2020	2025	2030	2035	2040	
美国	96.8	94.4	100.8	102.0	102.9	103.8	105.7	0.4
加拿大	14.5	14.5	15.1	15.6	16.3	17.1	18.1	0.8
墨西哥/智利	9.3	9.2	9.8	10.5	11.6	12.8	14.3	1.6
日本	21.2	20.8	21.9	22.3	22.3	22.2	21.5	0.1
韩国	11.3	11.4	13.9	14.7	15.4	16.1	16.9	1.4
澳大利亚/新西兰	6.9	6.8	7.6	8.1	8.5	9.2	10.1	1.4
俄罗斯	30.9	32.1	33.2	34.7	35.1	35.5	34.5	0.3
中国	109.4	115.0	147.3	159.4	170.4	180.7	190.1	1.8
印度	25.0	26.2	32.8	38.4	44.9	52.8	62.3	3.2
中东	29.9	31.7	40.8	45.4	50.7	56.6	61.8	2.4
非洲	20.1	21.5	26.1	30.0	33.8	38.4	44.0	2.6
巴西	14.8	15.2	16.3	18.1	20.0	22.0	24.3	1.7
总计	540.5	549.3	628.9	673.9	717.7	765.6	815.0	1.4

注：Btu 为英热单位，1 英热单位= $2.93071\times 10^4\text{kW}\cdot\text{h}$

资料来源：EIA: *International Energy Outlook 2016*

(IEO 2016) 报告指出，在化石燃料的消费中，石油占据主要份额，天然气份额增长最快，约在 2030 年将超越煤炭，煤炭消耗趋于稳定。可再生能源是世界上增长最快的能源，年增长

率达 2.6%。到 2040 年，煤炭、天然气和可再生能源的供应差不多达到平衡，在世界发电用燃料中大约各占 28%~29%的份额。

2015 年 12 月，全球探明的石油储藏量为 16560 亿桶，7 个国家占了 80%。2012 年产量为 9000 万桶/天，预计 2020 年产量为 1 亿桶/天，到 2040 年将达到 1.21 亿桶/天。即使按 1 亿桶/天计算，估计石油只能开采 45.4 年。世界石油消费量还在以 1%以上的速度增长，1990—2040 年世界按地区石油消费量如表 1-2 所示。

表 1-2 1990—2040 年世界按地区石油消费量（百万桶/天）

地 区		石油消费量						平均年增长百分比（%）	
		1990	2000	2012	2020	2030	2040	1990—2012	2012—2040
OECD 国家	美洲	20.6	24.3	23.2	24.4	24.3	24.6	0.5	0.2
	欧洲	14.0	15.6	14.1	13.7	13.7	14.0	0.0	0.0
	亚洲	7.6	8.8	8.2	7.7	7.5	7.5	0.4	-0.3
	小计	42.2	48.7	45.5	45.8	45.5	46.1	0.3	0.0
非 OECD 国家	欧洲和欧亚大陆	9.3	4.4	5.3	5.8	6.2	6.1	-2.5	0.5
	亚洲	6.6	12.5	21.5	26.7	32.2	38.9	5.5	2.1
	中东	3.3	4.5	7.7	10.0	11.3	13.2	3.9	2.0
	非洲	2.1	2.5	3.6	4.5	5.5	6.9	2.6	2.4
	美洲	3.8	5.0	6.7	7.5	8.5	9.6	2.7	1.3
	小计	25.0	29	44.8	54.5	63.6	74.8	2.7	1.9
世界总计		67.2	77.6	90.3	100.3	109.1	120.9	1.4	1.0

过去 20 年，新发现的天然气储藏量增加了 40%，2016 年达到了 6950 万亿立方英尺，2012 年世界天然气消费量为 120 万亿立方英尺，预计 2040 年将达到 203 万亿立方英尺。天然气的储藏量仅够用 30 多年。

能源领域中污染最严重的煤炭储藏量情况稍微乐观一些，截至 2012 年初，世界煤炭可采储量为 9779 亿短吨（1 短吨=0.9072t），2012 年产量是 88.98 亿短吨，如维持产量不变可开采 110 年。

2030 年以前，煤炭是仅次于石油的第 2 大能源，2030—2040 年，煤炭将是继石油和天然气之后的第 3 大能源。世界煤炭消费量在能源领域中增长是最慢的，2012—2040 年平均大约每年增加 0.6%。2012 年的消费量为 153（ $\times 10^{15}$ Btu），到 2020 年预计为 169（ $\times 10^{15}$ Btu），2040 年将为 180（ $\times 10^{15}$ Btu）。世界煤炭消费的 3 个大国分别是中国、美国和印度，合计占世界消费总量的 70%以上。2012 年中国大约占 50%，2040 年将降低至 46%。

中国在 2012—2040 年煤炭消费平均年增长率为 6.0%，预计在 2025 年中国的煤炭消费量将为 88（ $\times 10^{15}$ Btu），2040 年将降低到 83（ $\times 10^{15}$ Btu）。2012 年中国已探明煤炭可采储量为 1262 亿短吨。而当年产量是 42.56 亿短吨，只够开采 30 年。

印度的煤炭消费量将在 2030 年左右超过美国，在世界煤炭消费中的份额在 2012 年是 8%，到 2040 年将增加到 14%。图 1-1 为中国、美国和印度能源消费的变化情况预测。

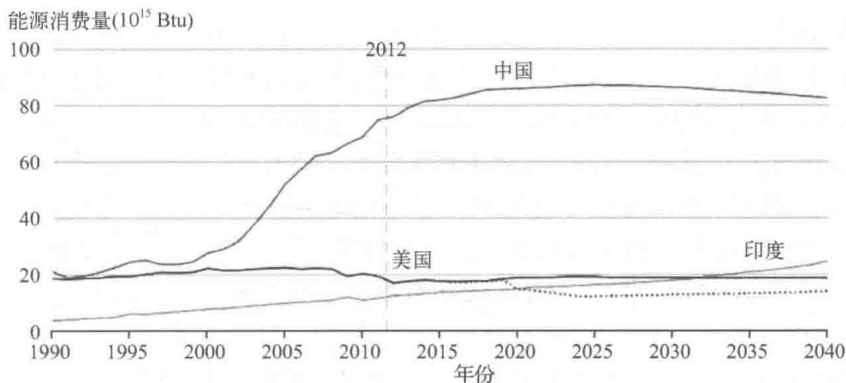


图 1-1 中国、美国和印度煤炭消费的变化情况

2016 年 6 月发布的《BP 世界能源统计年鉴 2016》指出，近 10 年全球一次能源消费量平均年增长率是 1.9%。2015 年全球一次能源消费增长 1.0%，是自 1998 年以来最低的。除欧洲和亚洲地区外，其他地区消费增速均低于其 10 年平均值。97% 的全球消费增长来自新兴经济体。中国一次能源消费增长 1.5%，但仍连续 15 年保持世界一次能源消费第一。

能源结构逐步从以煤炭为主转向以更低碳能源为主，但石油仍然是全球最重要的燃料，占全球一次能源消费的 32.9%。煤炭为第二大燃料，在全球一次能源消费中占比降至 29.2%，刷新 2005 年以来的最低纪录。天然气的消费也低于过去 10 年的平均值，占一次能源消费的 23.8%。2015 年世界部分国家一次能源消费结构如表 1-3 所示。

表 1-3 2015 年世界部分国家一次能源消费结构（百万吨油当量）

国家	原油	天然气	原煤	核能	水电	再生能源	合计
美国	851.6	713.6	396.3	189.9	57.4	71.7	2280.6
加拿大	100.3	92.2	19.8	23.6	86.7	7.3	329.9
巴西	137.3	36.8	17.4	3.3	81.7	16.3	292.8
俄罗斯	143.0	352.3	88.	44.2	38.6	0.1	666.8
法国	76.1	36.1	8.7	99.0	12.2	7.9	239.0
德国	110.2	67.2	78.3	20.7	4.4	40.0	320.6
英国	71.6	61.4	23.4	15.9	1.4	17.4	191.2
南非	31.1	4.5	86.0	2.4	0.2	1.0	124.2
中国	559.7	177.6	1920.4	38.6	254.9	62.7	3014.0
印度	195.5	45.5	407.2	8.6	28.1	15.5	700.5
日本	189.6	102.1	119.4	1.0	21.9	14.5	448.5

2015 年，全球探明石油储量减少了 24 亿桶（-0.1%）至 1.6976 万亿桶。而全球石油消费量达到每天 9440 万桶，接近过去 10 年平均增速的一倍。中国再次成为全球石油消费增长量最大的国家（+77 万桶/日）。中国石油依赖进口的情况也越来越严重，根据 IEA 的统计数据，2015 年中国石油日消费量已增至 1032 万桶的创纪录水平；中石油经济技术研究院报告的数据是：2015 年国内石油表观消费量估计为 5.43 亿吨。未来 6 年内中国石油日消费量将增长 250

万桶，净进口增长 9.6%至 737 万桶/天，创历史最高水平。对外依存度首次突破 60%，目前是世界第一大石油进口和消费国。而且从长远来看，这种趋势还将继续下去，预计石油进口依存度将从 2014 年的 59%升至 2035 年的 76%，高于美国在 2005 年的峰值。

能源消费不断增长的情况正面临挑战，地球上化石燃料的蕴藏量是有限的，根据《BP 世界能源统计年鉴 2016》，全球石油探明储量可满足 50.7 年的全球生产需要，天然气可满足 52.8 年，煤炭可满足 114 年，为目前化石燃料中最高储产比。据世界卫生组织估计，到 2060 年全球人口将达 100 亿~110 亿，如果到时所有人的能源消费量都达到今天发达国家的人均水平，则地球上主要的 35 种矿物中，将有 1/3 在 40 年内消耗殆尽，包括所有的石油、天然气、煤炭（假设为 2 万亿吨）和铀，所以世界化石燃料的供应正面临严重短缺的危机局面。

为了应对化石燃料逐渐短缺的严重局面，必须逐步改变能源消费结构，大力开发以太阳能为代表的可再生能源，在能源供应领域走可持续发展的道路，才能保证经济的繁荣发展和人类社会的不断进步。

1.1.2 保护生态环境逐渐受到人们的重视

由于人类的活动，主要依赖化石燃料的燃烧，造成环境污染，导致全球气候变暖、冰山融化、海平面上升、沙漠化日益扩大等现象的出现，自然灾害频繁发生。人们逐渐认识到：减少温室气体的排放，治理大气环境，防止污染已经到了刻不容缓的地步。

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发表的《气候变化 2007 综合报告》指出：自 1750 年以来，由于人类活动，全球大气中 CO₂、甲烷（CH₄）和氧化亚氮（N₂O）浓度已明显增加，目前已经远远超出了根据冰芯记录测定的工业化前几千年中的浓度值。2005 年大气中 CO₂ 和 CH₄ 的浓度已远远超过了过去 65 万年的自然范围。CO₂ 浓度的增加主要是由于化石燃料的使用，自工业化时代以来，由于人类活动已引起全球温室气体排放增加，其中 1970—2004 年增加了 70%。自 20 世纪中叶以来，大部分已观测到的全球平均温度的升高很可能是由于观测到的人为温室气体浓度增加所导致。过去 50 年，各大陆（南极除外）出现了显著的人为变暖。CO₂ 是最重要的人为温室气体，1970—2004 年 CO₂ 年排放量增加了约 80%，从 210 亿吨增加到 380 亿吨，在 2004 年已占到人为温室气体排放总量的 77%。温室气体以当前的或高于当前的速率排放将会在 21 世纪期间造成温度进一步升高，并会诱发全球气候系统中的许多变化，这些变化很可能大于 20 世纪期间所观测到的气候变化，可能导致一些不可逆转的影响。有中等可信度研究表明，如果全球平均温度增幅超过 1.5~2.5℃（与 1980—1999 年相比），所评估的 20%~30%的物种可能面临灭绝风险。如果全球平均温度升高超过约 3.5℃，模式预估结果显示，全球将出现大量物种灭绝（占所评估物种的 40%~70%）。表 1-4 给出了基于模式的针对 21 世纪末（2090—2099 年）全球地表温度升高和平均海平面上升的预估值。

表 1-4 21 世纪末全球平均地表温度升高和海平面上升预估值

个 例 ^②	温度变化（与 1980—1999 年相比，2090—2099 年时段的温度，单位为℃） ^{①、④}		海平面上升（与 1980—1999 年相比，2090—2099 年时段的高度，单位为 m）
	最佳估值	可能范围	基于模式的变化范围， 不包括未来冰流的快速动力变化
稳定在 2000 年的浓度水平 ^③	0.6	0.3~0.9	无
B1 情景	1.8	1.1~2.9	0.18~0.38

续表

个 例 ^①	温度变化（与 1980—1999 年相比，2090—2099 年时段的温度，单位为℃） ^{①,②}		海平面上升（与 1980—1999 年相比，2090—2099 年时段的高度，单位为 m）
	最佳估值	可能范围	基于模式的变化范围， 不包括未来冰流的快速动力变化
A1T 情景	2.4	1.4~3.8	0.20~0.45
B2 情景	2.4	1.4~3.8	0.20~0.43
A1B 情景	2.8	1.7~4.4	0.21~0.48
A2 情景	3.4	2.0~5.4	0.23~0.51
A1F1 情景	4.0	2.4~6.4	0.26~0.59

注：①评估温度的最佳估值和可能的不确定性区间，源自复杂程度不一的各类模式及观测限制。

②2000 年的固定成分从大气—海洋环流模式（AOGCM）反演而来。

③上述所有情景是 6 个 SRES 标志情景。在 SRES B1、AIT、B2、A1B、A2 和 A1F1 解释性标志情景下，对应 2100 年人为温室气体和气溶胶产生的强迫辐射（参见《第三次评估报告》第 823 页）的近似 CO₂ 当量浓度大约分别是 600ppm、700ppm、800ppm、850ppm、1250ppm 和 1550ppm。

④温度变化用于 1980—1999 年平均差表示。为了表示相对于 1850—1899 年的变化，再加上 0.5℃

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）的结论是：要在 2050 年将全球平均温度升高控制在 2.0~2.4℃，需要在 2000 年基础上降低全球 CO₂ 排放量的 50%~85%。高排放水平将导致更加显著的气候变化（如表 1-5 所示）。目前的研究发现，气候变化比过去预期的更快，甚至在 2050 年全球 CO₂ 的排放量降低 50%也不足以避免温度上升的危险（UNSW2009）。

表 1-5 CO₂ 排放量与气候变化的关系

温度上升/℃	全部温室气体 (ppm 等效 CO ₂)	CO ₂ (ppm CO ₂)	2050 年 CO ₂ 排放量相当于 2000 年的百分数 (%)
2.0~2.4	445~490	350~400	-85~-50
2.4~2.8	490~535	400~440	-60~-30
2.8~3.2	535~590	440~485	-30~+5
3.2~4.0	590~710	485~570	+10~+60
4.0~4.9	710~885	570~660	+25~+85
4.9~6.1	885~1130	660~790	+90~+140

资料来源：IPCC 2007

2015 年，来自能源消费的 CO₂ 排放仅增长了 0.1%，除 2009 年经济衰退时期外，这是 1992 年以来的最低增速。美国（-2.6%）和俄罗斯（-4.2%）排放量降低的绝对值最大，但印度（+5.3%）排放增幅最大。中国自 1998 年以来首次出现排放量下降。

2016 年 11 月生效的《巴黎气候变化协定》本质上是一项能源协定。能源消费至少占温室气体排放的 2/3，能源行业的革命性转变对于实现《巴黎协定》的目标至关重要。2015 年，能源相关的 CO₂ 排放增长基本停滞。这主要是由于全球经济的能源强度降低了 1.8%，能效提高及全球各地清洁能源利用的增加。能源行业每年的投资额大约为 1.8 万亿美元，其中越来越多的投资被吸引到清洁能源。与此同时，上游油气行业的投资却在锐减。2015 年化石燃料的补

贴额从前一年的将近 5000 亿美元，下降到 3250 亿美元，这反映了化石燃料价格的走低，以及针对化石燃料补贴的改革在好几个国家已经取得了进展。

International Energy Outlook 2016 统计并预测了部分国家和地区 1990—2040 年的 CO₂ 排放量，如表 1-6 所示。2012—2040 年的 CO₂ 排放量平均年增长率为 1.0%。

表 1-6 部分国家和地区 1990—2040 年的 CO₂ 排放量统计及预测（10 亿吨）

地区/国家	1990	2012	2020	2030	2040	平均年变化率	平均年变化率	总计变化	总计变化率
						(%)	(%)	(10 亿吨)	(%)
						1990—2012	2012—2040	2012—2040	2012—2040
美国	5	5.3	5.5	5.5	5.5	0.1	0.2	0.4	6.9
加拿大	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	0.5	0.1	14.9
墨西哥/智利	0.3	0.5	0.5	0.6	0.7	1.9	1.1	0.2	35.7
日本	1	1.2	1.2	1.2	1.1	0.8	-0.4	-0.1	-10.9
韩国	0.2	0.6	0.7	0.8	0.8	4.5	1	0.2	32.9
澳大利亚/新西兰	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	1.8	0.8	0.1	26.7
俄罗斯	2.4	1.8	1.8	1.9	1.9	-1.3	0.1	0.1	3.8
中国	2.3	8.4	9.9	10.6	11.1	6.1	1	2.7	31.9
印度	0.6	1.8	2.1	2.7	3.7	5.3	2.7	2	109.9
中东	0.7	1.9	2.4	2.9	3.4	4.8	2.2	1.6	82
非洲	0.7	1.2	1.4	1.8	2.2	2.7	2.3	1.1	89.2
巴西	0.2	0.5	0.5	0.7	0.8	3.5	1.5	0.3	52.4
世界总计	21.4	32.3	35.6	39.1	43.2	1.9	1	10.9	33.9

该报告还对燃烧不同种类燃料产生的 CO₂ 排放量进行了统计和预测，结果如图 1-2 所示。液体燃料在 1990 年产生的 CO₂ 排放占比最高，为全球 CO₂ 排放量的 43%。2012 年下降至 36%，预测至 2040 年将维持同样比例。煤炭在 1990 年 CO₂ 排放量占全球 CO₂ 排放量的 39%，2012 年为 43%，2040 年将下降至 38%，比液体燃料略高。但煤炭作为碳含量最高的化石燃料，从 2006 年起 CO₂ 排放量占比始终为最高。天然气在总的 CO₂ 排放量中占比相对较小，从 1990 年的 19%，2012 年的 20%，增加至 2040 年的 26%。

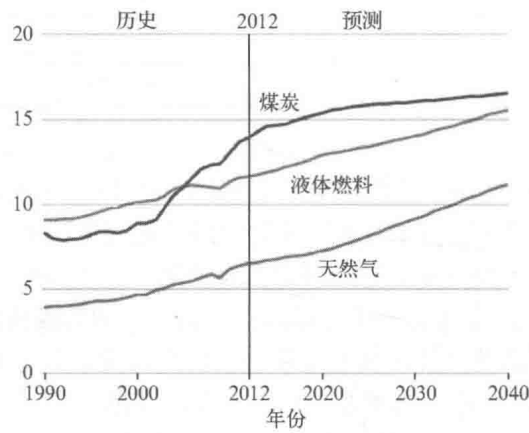


图 1-2 1990—2040 年全球不同种类燃料产生的 CO₂ 排放量（×10 亿吨）

国际能源署（IEA）在 2016 年 5 月发表的 *CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights (2016 Edition)* 列出了部分国家 1971—2014 年燃料燃烧的 CO₂ 排放量，也对中国近年来不同类型的燃料所产生的 CO₂ 排放量进行了统计，如表 1-7 所示。同时也列出了近年来中国各类燃料的 CO₂ 排放量（如表 1-8 所示），还指出 2014 年世界 CO₂ 排放前 10 个国家分别是中国、美国、印度、俄罗斯、日本、德国、韩国、伊朗、加拿大和沙特阿拉伯，如图 1-3 所示。

表 1-7 部分国家 1971—2014 年燃料燃烧 CO₂ 排放量 (×10⁶t)

年度 地区	1971	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2013	2014	1990— 2014 年 变化率 (%)
美国	4 288.1	4 355.0	4 594.9	4 513.7	4 802.5	5 073.2	5 642.6	5 702.3	5 347.0	5 103.2	5 176.2	7.8%
加拿大	340.1	377.0	422.2	393.8	419.5	448.9	516.2	535.1	525.8	549.7	554.8	32.2%
日本	750.7	849.5	870.2	865.9	1 040.6	1 107.7	1 141.2	1 177.7	1 111.8	1 229.6	1 188.6	14.2%
法国	423.2	422.9	455.1	351.7	345.5	343.5	364.5	370.4	340.1	317.1	285.7	-17.3%
俄罗斯					2 163.2	1 548.0	1 474.2	1 481.7	1 528.9	1 534.6	1 467.6	-32.2%
德国	978.2	973.4	1 048.4	1 004.6	940.3	856.7	812.4	786.8	758.9	763.9	723.3	-23.1%
英国	621.0	575.9	570.5	543.4	547.7	513.7	521.2	531.2	476.8	449.7	407.8	-25.5%
南非	157.1	203.0	208.4	222.9	243.8	259.8	280.5	372.3	406.7	423.3	437.4	79.4%
中国	789.4	1 040.2	1 378.4	1 648.0	2 109.2	2 923.6	3 126.5	5 399.4	7 749.0	9 025.9	9 134.9	333.1%
印度	181.0	217.1	262.0	375.8	530.4	707.7	890.4	1 079.6	1 594.3	1 852.5	2 019.7	280.8%
巴西	87.5	129.6	167.7	156.2	184.3	227.7	292.3	310.5	370.5	451.3	476.0	158.4%
合计	13 942.2	15 484.1	17 706.3	18 246.5	20 502.5	21 362.0	23 144.5	27 037.7	30 450.4	32 129.4	32 381.0	57.9%

表 1-8 近年来中国各类燃料的 CO₂ 排放量 (×10⁶t)

年度 燃料	1971	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2013	2014	1990—2014 年变化率 (%)
煤炭	659.5	818.4	1101.5	1397.1	1802.1	2483.6	2536.8	4544.6	6514.8	7528.8	7569.3	320.0
石油	122.5	204.3	248.6	234.3	286.5	412	546.9	776.8	1016.0	1016.9	1195.7	317.3
天然气	7.4	17.5	28.3	16.6	20.6	28.0	42.9	78.0	195.6	304.6	336.3	628.8
总计	789.4	1040.2	1378.4	1648	2109.2	2923.6	3126.6	5399.4	7726.4	8850.3	9101.3	333.1

2014 年全球 CO₂ 排放量为 32.4Gt，而前 10 个国家总和为 21.8Gt，占 CO₂ 排放总量的 2/3。按行业分类统计：发电和供热排放的 CO₂ 最多，占排放总量的 42%，交通运输占 23%，工业占 19%，住宅占 6%，其他为 10%。可见，采取措施减少发电排放的 CO₂ 十分重要。

由表 1-7 可见，1990—2014 年全球 CO₂ 排放量年平均增长率为 57.9%，而同期中国年平均增长达到了 333.1%。这一方面是由于经济高速增长，导致排放量增加，另一方面与能源消费结构有关，中国的能源利用率不高，能源消费以燃煤为主，煤炭中所含的硫等有害成分很高，所以受到普遍关注。据世界银行估计，到 2020 年中国由于空气污染造成的环境和健康损

失将达到 GDP 总量的 13% 。

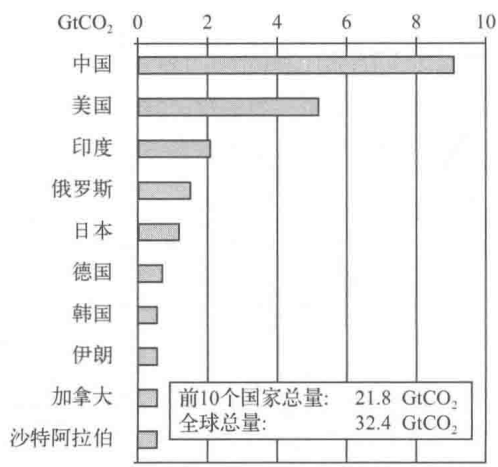


图 1-3 2014 年世界 CO₂ 排放量前 10 个国家情况

减少 CO₂ 排放量，保护人类生态环境，已经成为当务之急。太阳能是清洁无公害的新能源，光伏发电不排放任何废弃物，大力推广光伏发电将对减少大气污染、防止全球气候变化做出有效贡献。

1.1.3 常规电网的局限性

根据国际能源署（IEA）发表的 *World Energy Outlook 2016* 披露，尽管许多国家都加强了能源工作力度，但依然有大量人群无法享用现代能源。到 2014 年，全世界还有接近 12 亿人无法获取电力，主要集中在撒哈拉以南非洲的农村地区。有大约 27 亿人依然依靠固体物质进行炊事，这意味着他们会继续暴露于烟雾缭绕的室内环境，而这会造成每年 350 万人过早死亡。无电人口大部分生活在经济不发达的边远地区，由于居住分散，交通不便，很难通过延伸常规电网的方法来解决用电问题。IEA 预计，到 2040 年全球仍然还有大约 5 亿多人口用不上电。如表 1-9 所示。

表 1-9 世界无电地区人口分布（百万人）

地区 \ 年度		2014	2030	2040
沙哈拉以南非洲		634	619	489
亚洲发展中 国家	小计	512	166	47
	印度	244	56	0
拉丁美洲		22	0	0
中东		18	0	0
世界合计		1186	784	536

（REN21）发布的《2016 年全球可再生能源现状报告》中指出，到 2013 年还有 17% 的全球面积没有电网覆盖，全球无电人口 12.01 亿，其中农村占 80%。非洲有 6.35 亿，北美洲 100 万，亚洲发展中国家 5.26 亿（中国 100 万），拉丁美洲 2200 万，中东 1700 万。2013 年无电人口在 1500 万以上的国家有 20 个（如表 1-10 所示）。由于非洲人口增加很快，自 2000 年以