

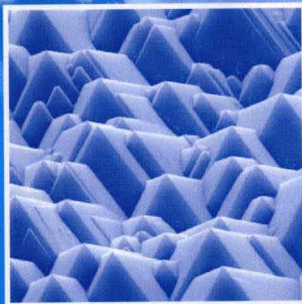
# 太阳能光伏产业

——光伏发电技术及应用系列教材

# 太阳能光伏学

郭连贵 主 编

周 青 张洪涛 副主编



TAIYANGNENG  
GUANGFUXUE



化学工业出版社

太阳能光伏产业——光伏发电技术及应用系列教材

# 太阳能光伏学

郭连贵 主编

周 青 张洪涛 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统概述太阳能光伏发电的特性、基本原理、系统组成和实际应用。第1章主要概述太阳能及其利用背景、意义以及目前光伏产业的发展状况；第2章重点阐述太阳电池的工作原理及其主要特性；第3章介绍常用太阳能光电材料（如晶体硅太阳电池、薄膜太阳电池）的基本性质、制备原理、制备技术以及太阳电池结构；第4章概述光伏发电系统的种类、组成及其工作原理；第5章详细介绍光伏发电系统的设计，如蓄电池容量的设计、太阳电池方阵的设计；第6章按类别介绍光伏发电系统在各个领域的应用情况，并介绍一些典型的应用范例。

本书可作为应用型高等院校的半导体物理与器件、材料科学与工程、光伏材料加工与应用等专业的师生作为教材，也可作为高职高专太阳能光伏产业硅材料技术、光伏技术应用专业的教材，还可供从事太阳能光伏相关行业研究和开发的工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能光伏学/郭连贵主编. —北京: 化学工业出版社, 2012.7  
太阳能光伏产业——光伏发电技术及应用系列教材  
ISBN 978-7-122-14539-0

I. 太… II. 郭… III. 太阳能发电-教材  
IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 126524 号

---

责任编辑: 张建茹 刘 哲 蒋余涛  
责任校对: 王素芹

文字编辑: 孙 科  
装帧设计: 韩 飞

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装: 三河市延风印装厂  
787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 280 千字 2012 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 26.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

太阳能光伏发电是通过半导体器件将太阳辐射能转化为电能的一种发电方式，开发利用太阳能对于解决能源危机、改善生态环境和改善人民生活条件具有巨大的经济、政治和社会效益。

本书以培养学生的技术应用能力为主线设计培养方案，以应用为主旨构建课程体系和教材内容，旨在为国家培养更多的高技术应用型人才。因此，本书在编写过程中，力求以“应用”为导向，基础理论以“讲清概念，强化应用”为重点，突出了教学内容的实用性。此外，本书在编写过程中努力做到语言精练、通俗易懂；叙述力求深入浅出、层次分明、重点突出；理论的阐述注重与工程实用性相结合，培养学生的工程意识。

从内容上看，该书包括太阳能、太阳电池、光伏发电系统三部分；从结构上看，全书共分6章，第1章主要概述太阳能及其利用背景、目前光伏产业的发展状况等；第2章重点阐述太阳电池的工作原理及其主要特性；第3章介绍常用太阳能光电材料（如晶体硅太阳电池、薄膜太阳电池）的基本性质、制备原理、制备技术以及太阳电池结构；第4章概述光伏发电系统的种类、组成及其工作原理；第5章详细介绍光伏发电系统的设计，如蓄电池容量的设计、太阳电池方阵的设计；第6章按类别介绍光伏发电系统在各个领域的应用情况，并介绍一些典型的应用范例。

本书可作为应用型高等院校的半导体物理与器件、材料科学与工程、光伏材料加工与应用等专业的师生作为教学参考书，也可作为高职高专太阳能光伏产业硅材料技术、光伏技术应用专业的教材，还可供从事太阳能光伏相关行业研究和开发的工程技术人员参考使用。

本书由郭连贵主编，并负责第1、2、3、4、5章的编写；周青、张洪涛编写第6章；其中曾玉、胡志鹏参加了第2章的编写；王定友参加了第5章的编写。曾玉收集了部分资料，全书由郭连贵统稿。同时本书在编写过程中参阅和利用了国内外相关文献资料，充实和丰富了本书的内容，江西省省级特色专业材料科学与工程建设项目和化学工业出版社对本书的出版也给予了大力支持，在此一并表示感谢。

太阳能光伏产业涉及面广、发展迅速，由于水平有限，书中难免有不足之处，恳请各位专家、同仁和广大读者批评指正。

编 者  
2012.5

# 目 录

<b>第 1 章 太阳能及其利用概述</b> .....	1
1.1 开发利用太阳能的意义 .....	1
1.2 太阳能与太阳辐射 .....	7
1.3 太阳能的利用 .....	11
1.4 太阳能光伏产业的发展状况 .....	15
<b>第 2 章 太阳电池的工作原理及其特性</b> .....	24
2.1 半导体物理基础 .....	24
2.2 太阳电池工作原理 .....	28
2.3 太阳电池的特性 .....	30
2.4 太阳电池的表征 .....	35
思考题 .....	37
<b>第 3 章 太阳电池的制备及其结构</b> .....	38
3.1 太阳电池的分类 .....	38
3.2 晶硅太阳电池的制造 .....	40
3.3 薄膜太阳电池 .....	64
3.4 第三代太阳电池 .....	82
思考题 .....	85
<b>第 4 章 太阳能光伏发电系统概述</b> .....	86
4.1 太阳能光伏发电系统的组成及其工作原理 .....	86
4.2 太阳能光伏发电系统的种类 .....	87
4.3 太阳电池方阵 .....	91
4.4 蓄电池 .....	94
4.5 控制器 .....	100
4.6 逆变器 .....	102
思考题 .....	105
<b>第 5 章 太阳能光伏发电系统的设计</b> .....	106
5.1 光伏系统的容量设计 .....	106
5.2 光伏系统的硬件设计 .....	119
5.3 太阳能光伏发电系统设计软件介绍 .....	122
5.4 光伏系统的安装、调试及维护 .....	127
思考题 .....	129
<b>第 6 章 太阳能光伏发电系统的应用</b> .....	130
6.1 独立光伏发电系统的应用 .....	130
6.2 并网光伏发电系统的应用 .....	150
6.3 风光互补混合光伏系统的应用 .....	154

6.4 光伏组件特殊应用——光伏建筑一体化 (BIPV) .....	155
6.5 太阳电池在太空领域的应用 .....	164
6.6 太阳能光伏发电系统典型工程应用 .....	165
思考题 .....	174
<b>参考文献</b> .....	175

# ..... 第 1 章 太阳能及其利用概述 .....

信息、能源和材料是 21 世纪的三大支柱产业。其中，能源与环境的可持续发展已成为人类最关注的重大问题之一。大力发展可再生能源技术是解决这个重大问题的唯一选择。太阳能在各种可再生能源技术中具有最理想的可持续发展特征，即最丰富的资源和最洁净的发电过程，已成为世界可再生能源发展的最大着力点和亮点。

本章讲述人类开发利用太阳能的意义，并阐述太阳能的基本性质、人类利用太阳能的历史，最后介绍世界及中国太阳能光伏产业发展的现状及趋势。

## 1.1 开发利用太阳能的意义

进入 21 世纪，随着全球经济增长引发的能源高消耗，使常规化石燃料能源不仅在满足人类社会发展上已经捉襟见肘，而且因化石燃料过度消耗引起的全球变暖以及生态环境恶化给人类带来了更大的生存威胁。因此，无论是从经济社会走可持续发展之路和保护人类赖以生存的地球生态环境的高度来审视，还是从为世界上 20 多亿无电人口解决现实的能源供应问题出发，发展以太阳能为主的新能源和可再生能源均具有重大战略意义。

### 1.1.1 缓解能源危机

能源亦称能量资源，是指可产生各种能量（如热量、电能、光能和机械能等）或可做功的物质的统称。能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源，是整个世界发展和经济增长的最基本的驱动力，是人类赖以生存的基础。

能源种类繁多，根据不同的划分方式，能源也可分为不同的类型。

① 按能源的来源可分为三类 第一类来自地球以外的太阳能。它们除了太阳直接照射到地球的光和热外，常见的煤炭、石油、天然气，以及生物质能、水能、海洋热能和风能等，都间接地来自太阳。第二类是来自地球自身的能源，其中一种是地球内部蕴藏着的地热能，常见的地下蒸汽、温泉、火山爆发的能量都属于地热能；另一种是地球上存在的铀、钍、锂等核燃料所蕴有的核能。第三类是太阳和月亮等星球对大海的引潮力所产生的涨潮和落潮所拥有的巨大潮汐能。

② 按能源能否从自然界中得到补充分为可再生能源和不可再生能源 太阳辐射能、水能、生物质能、风能、潮汐能、海洋热能和波浪能等都是能够不断地再生和得到补充的能源，称为可再生能源。而煤炭、石油、天然气等化石燃料和铀、钍等核燃料，都是亿万年前遗留下来的，用掉一点就少一点，无法得到补充，总有一天会枯竭，称为不可再生能源。

③ 按能源利用形态的不同分为一次能源和二次能源 一次能源是指直接取自自然界、而不改变它的形态的能源。例如，煤炭、石油、天然气、柴草、地热、风力、太阳辐射能等都属一次能源范畴。二次能源是指一次能源经人为加工成另一种形态的能源。例如，电能、热水、蒸汽、煤气、焦炭以及各种石油制品（诸如汽油、煤油、柴油、重油等），还有生产中的余能和余热等也都属于二次能源范畴。

④ 按能源的应用范围、技术成熟程度及经济与否可将能源分为常规能源和新能源 煤

炭、石油、天然气、水能和核能等都已得到大规模经济开发和利用，称为常规能源；而太阳辐射能、地热能、风能、海洋热能、波浪能、潮汐能等，因它们都是开发研究中的能源，尚未得到经济开发利用，称为非常规能源，或新能源。

人类对能源的利用可分为前工业化时代、工业化时代及后工业化时代，如图 1-1 所示。

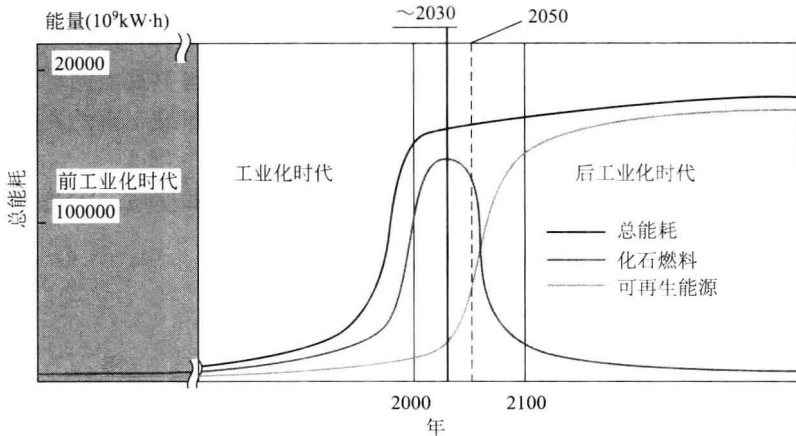


图 1-1 人类能源利用演化史

在前工业化时代，即 18 世纪之前，社会财富和能源消耗水平很低，人类只限于对风力（帆船、风车等）、水力（水车）、畜力（牛、马等）、木材等天然能源的直接利用，尤其是木材，在世界一次能源消费结构中长期占据首位。

在工业化时代，蒸汽机的出现加速了 18 世纪开始的产业革命，促进了煤炭的大规模开采，到 19 世纪下半叶，出现了人类历史上第一次能源转换。1860 年，煤炭在世界一次能源消费结构中占 24%，1920 年上升为 62%。从此，世界进入了“煤炭时代”。19 世纪 70 年代，电力代替了蒸汽机，电器工业迅速发展，煤炭在世界能源消费结构中的比重逐渐下降。1965 年，石油首次取代煤炭占据首位，世界进入了“石油时代”。1979 年，世界能源消费结构的比重是：石油占 54%，天然气和煤炭各占 18%，油、气之和高达 72%。石油取代煤炭完成了能源的第二次转换。

工业化时代以高能源、高资源消耗为代价赢得了丰富的物质财富和科学技术高度的发展，但同时也造成化石燃料资源极大浪费。据美国能源部能源信息管理综合分析及预测办公室（EIA）于 2011 年 5 月的能源形势估计，随着世界人口的持续增长和经济的不断发展，人类对于能源的需求日益增加，到 2030 年全球的能源消费将增长 51%；2050 年的能源需求将是目前的 3 倍。然而，在目前的能源消费结构中，人类所利用的能源主要是石油、天然气和煤炭等化石燃料。这些化石能源本质上是数万年前甚至更长时间以来太阳能辐射到地球上的一部分能源储存到古生物（古植物和古动物）中，经沧海桑田的变化而演化成今天地球上的能源矿藏，是地球上不可再生的天然矿物一次能源，其蕴藏量是有限的。根据已探明的储量，按目前开采速度，石油只能开采约 45 年，天然气的开采也只能维持 61 年左右，煤炭还可开采 200~300 年，铀矿约 71 年，如图 1-2 所示。据世界卫生组织估计，到 2060 年全球人口将达 100~110 亿，届时地球上主要的 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、煤炭和铀。中国虽然拥有居世界第一位的水能资源，居世界第二位的煤炭探明储量，居世界第 11 位的石油探明可采储量，但由于中国人口众多，人均能源资



源拥有量在世界上处于较低的水平，一次能源的储量低于世界平均值，如图 1-2 所示，能源供应形势不容乐观，中国的能源危机问题更为严峻。因此，随着化石能源的逐步消耗，能源可供量与需求量之间的矛盾所构成的能源危机已展现在人类面前，成为全世界所面临的重大问题之一。

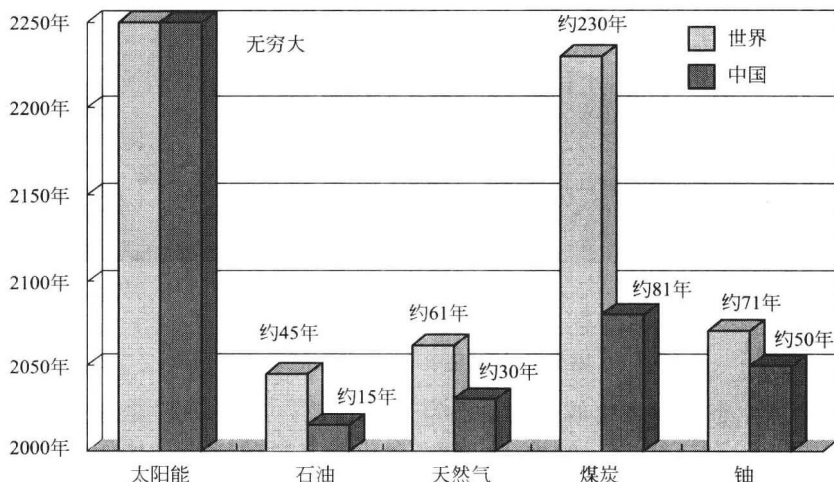


图 1-2 中国与世界化石燃料储量的比较

实际上，能源危机早已存在。18 世纪初就曾发生过一次席卷英国的“柴薪危机”，它是由于人口的增加，使森林滥遭砍伐的结果，这次危机导致当时靠木炭炼铁的英国钢铁工业几乎濒临破产的境地，但长期以来并未引起人们的注意。直到 20 世纪 70 年代爆发了两次“石油危机”，使得一些一直依赖中东石油的国家经济受到很大冲击。如美国在 1973 年前，国民经济以 6% 的速度增长，1974 年下降 3.2%，国民生产总值损失近 900 亿美元；日本在 1973 年前国民经济以 10% 的速度增长，1974 年不但没增长，还减少了 32%，国民生产总值损失近 500 亿美元，从而结束了“高速增长时期”。两次“石油危机”使能源供需的矛盾尖锐地暴露出来，这才成为举世瞩目的重大问题。

从工业化时代能源利用的情况来看，在人类开发利用能源的历史长河中，以石油、天然气和煤炭等化石能源为主的时期，注定不是一个太长的阶段，它终将走向枯竭。据预测（图 1-1），化石燃料的生产和消耗在 2020~2030 年之间将达到峰值。为了应对化石燃料逐渐短缺的严重能源危机问题，在后工业化时代，必须改变能源消费结构，必须大力开发可再生能源，让可再生能源体系的消费居于主导地位，在能源供应领域走可持续发展的道路。在各种可再生能源中，太阳能是发展最快的。根据欧盟联合研究中心 21 世纪能源变革预测（图 1-3），到 2030 年太阳能发电将在世界电力的供应中显现其重要作用，达到 10% 以上，可再生能源在总能源结构中占到 30%；2050 年太阳能发电将占总能耗的 25%，可再生能源占到 50% 以上；到本世纪末太阳能发电将在能源结构中起到主导作用，太阳能发电将占总能耗的 60% 以上，可再生能源在总能源结构中占到 80% 以上。因此，太阳能将是目前化石能源的主要替代能源。

### 1.1.2 改善生态环境

除资源枯竭问题外，化石能源的大量开发和利用从环境角度来看是造成大气和其他类型环境污染与生态破坏的主要原因，环境保护也是不容忽视的问题。

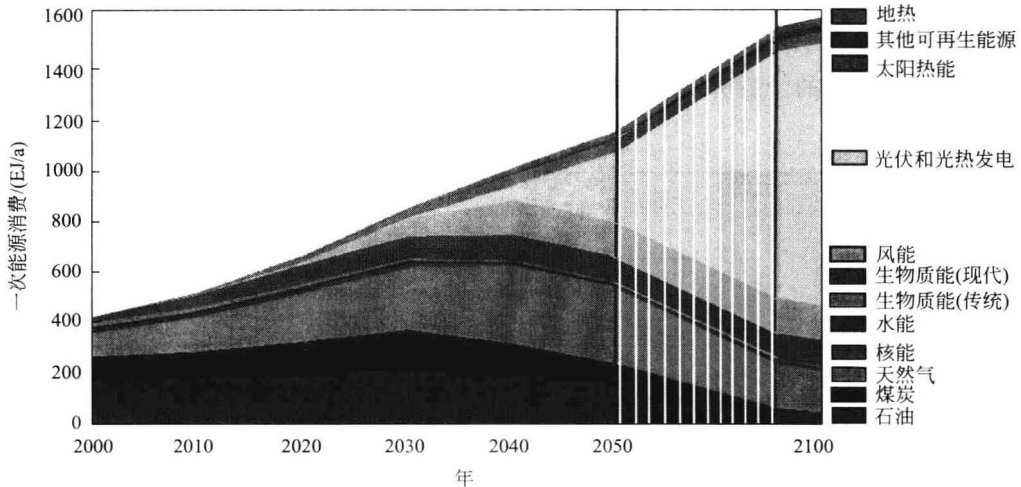


图 1-3 欧盟联合研究中心 21 世纪能源变革预测

目前造成全球生态环境恶化的元凶是温室气体排放，其中  $\text{CO}_2$  是最大的排放源，大约占 80%，如图 1-4 所示；而  $\text{CO}_2$  的排放主要来自化石燃料的燃烧（如燃煤、燃油及燃气）。据 Energy Outlook 2007 统计并预测，世界  $\text{CO}_2$  排放量的年平均增长率为 1.8%，到 2030 年  $\text{CO}_2$  的排放量将是 1990 年的两倍多。观测资料表明，在过去 100 年中，全球平均气温上升了  $0.3\sim 0.6^\circ\text{C}$ ，全球海平面平均上升了  $10\sim 25\text{cm}$ ，这就是所谓的地球“温室效应”。据相关报告预测，如果不对温室气体采取减排措施，从 21 世纪起，全球平均气温每 10 年将可升高  $0.2^\circ\text{C}$ ，到 2100 年全球平均气温将升高  $1.8\sim 4^\circ\text{C}$ ，22 世纪海平面将至少上升  $19\sim 37\text{cm}$ ，如果近年出现的北极冰层大量融化的趋势继续发展，海平面最多将上升  $28\sim 58\text{cm}$ ，不少海岛和沿海城市将沉入海底。如果全球温度平均上升  $6^\circ\text{C}$ ，人类就可能面临毁灭。此外，生态环境的恶化也导致沙漠化日益扩大、自然灾害频繁发生。从经济角度来看，温室效应还导致全球年经济损失达 4300 亿美元。

中国生态环境形势同样异常严峻。由于不合理的能源结构（以煤为主）、用能效率低及粗犷式经济发展导致中国环境形势恶化和严峻。煤直接燃烧排放的污染物是中国大气污染的主要原因，其中大气污染物中 87% 的  $\text{SO}_2$ 、71% 的  $\text{CO}_2$ 、67% 的  $\text{NO}_x$ 、60% 的烟尘均来自煤直接燃烧。由于能源利用和其他污染源大量排放环境污染物，造成全国 57% 的城市颗粒物超过国家限值；有 48 个城市的  $\text{SO}_2$  浓度超过国家二级排放标准；有 82% 的城市出现过酸雨，面积已达国土面积的 30%；许多城市的  $\text{NO}_x$  有增无减，其中北京、广州、乌鲁木齐和鞍山超过国家二级排放标准。近年来，由于城市汽车大幅度增加，燃用汽油产生的汽车尾气已成为城市环境的重要污染源。2000 年中国排放  $\text{SO}_2$  居世

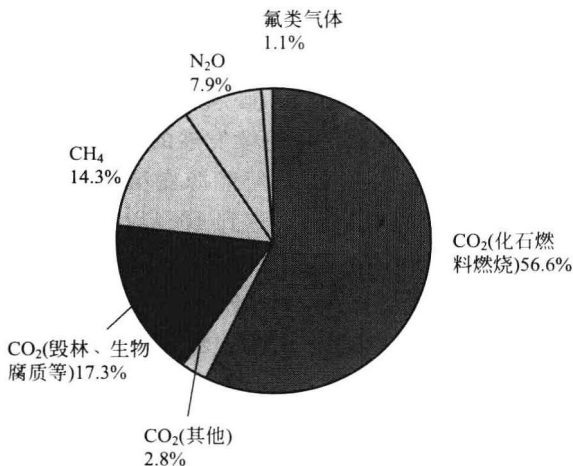


图 1-4 造成全球生态环境恶化的气体排放

的主要原因，其中大气污染物中 87% 的  $\text{SO}_2$ 、71% 的  $\text{CO}_2$ 、67% 的  $\text{NO}_x$ 、60% 的烟尘均来自煤直接燃烧。由于能源利用和其他污染源大量排放环境污染物，造成全国 57% 的城市颗粒物超过国家限值；有 48 个城市的  $\text{SO}_2$  浓度超过国家二级排放标准；有 82% 的城市出现过酸雨，面积已达国土面积的 30%；许多城市的  $\text{NO}_x$  有增无减，其中北京、广州、乌鲁木齐和鞍山超过国家二级排放标准。近年来，由于城市汽车大幅度增加，燃用汽油产生的汽车尾气已成为城市环境的重要污染源。2000 年中国排放  $\text{SO}_2$  居世

界第一，其中 90% 是由燃煤排放的；2007 年中国 CO<sub>2</sub> 排放也一跃成为世界第一，如图 1-5 所示。据英国石油公司（BP）发布的《世界能源统计年鉴》指出，中国 2011 年 CO<sub>2</sub> 排放 83.3 亿吨，占世界排放总量的四分之一，而美国则是第二大排放国，CO<sub>2</sub> 排放量达到 61.4 亿吨。因此，中国来自世界减排的压力与日俱增。

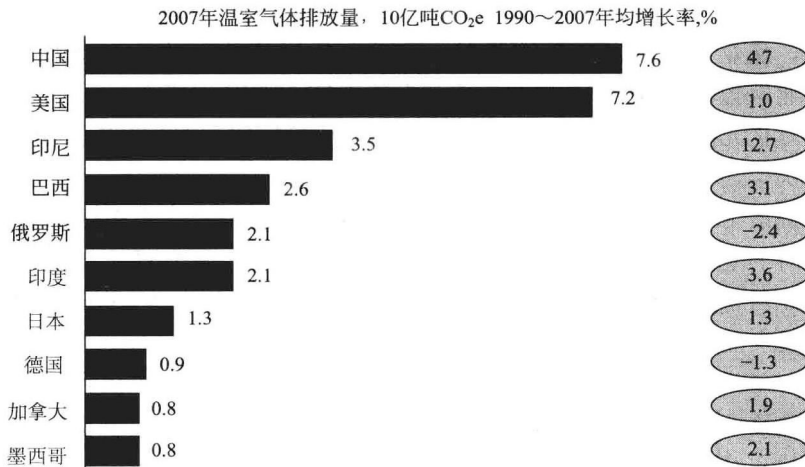


图 1-5 2007 年世界 CO<sub>2</sub> 排放排序 (资料来源: 国际能源署)

如何在开发和使用时，保护好人类赖以生存的地球生态环境，已经成为一个全球性的重大问题。目前，世界各国都在纷纷采取提高能源效率和改善能源结构的措施，以解决这一与能源消费密切相关的重大环境问题。所谓的能源效率革命和清洁能源革命，也就是通常所说的节约能源和发展清洁干净的新能源和可再生能源。在目前各种发电方式的二氧化碳排放率 [单位: 吨二氧化碳/(kW·h)] 方面，煤炭发电为 1.2，石油发电为 0.94，天然气发电为 0.44，而太阳能发电和风能发电均为 0。可见，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。因此，为了实现人类与环境的可持续发展，大力发展和推广以太阳能为主的新能源和可再生能源，使之逐渐替代化石能源的使用，对减少大气污染、防止全球气候变化、发展低碳经济、保护生态环境等具有十分重要的意义。

### 1.1.3 改善民生

迄今，世界上还有将近 20 亿人口尚未用上电。中国截止到 2005 年年底大约还有 270 万无电户，1150 万无电人口。这些地方，多为边远偏僻的山区、牧区、高原、海岛、沙漠，缺乏常规能源资源，同时远离大电网、人口稀少、居住分散、用电负荷不大、交通极不方便，但其太阳能资源相当丰富。因此，充分利用这些地区得天独厚的太阳能资源，有计划有步骤地、因地制宜地推广用户用太阳能光伏电源系统，以满足这些无电地区广大农牧民照明、听广播、看电视等生活用电的需要，是一条重要的途径。当前，这些地方由于没有电，仍然过着“日出而作，日落而息”、远离现代文明的生活，经济不发达，科学文化落后，文盲多，人口素质低下。如果通了电，就可大大促进这些地区经济的发展，提高科学文化水平，改善人口素质，尽快摆脱贫穷落后、走上文明富裕的道路。

有些特殊领域，如海上航标、高山气象站、地震测报台、森林火警监视站、光缆通信中继站、微波通信中继站、边防哨所、输油输气管道阴极保护站等，在无常规电源等特殊条件下，其供电电源由太阳能提供，不仅不消耗燃料，无人值守，而且安全、可靠、经济。

此外，发展太阳能光伏产业，不仅可以促进经济发展，还可以增加就业岗位，提高人民

生活水平。在光伏产业的经济效益方面，2006年欧洲光伏市场的销售额为57亿欧元，2007年达到131亿，增加了一倍多，预期到2030年销售额将增加到4543亿欧元。在促进就业方面，据相关研究报告表明，到2030年，全世界光伏行业将雇佣1000万个全员劳动力，分布在光伏组件和配套部件的研发、制造、运输、安装及维护过程中，如表1-1。其中安装和市场流通人数超过一半。2007年中国光伏产业及其带动的产业总计销售额接近1000亿元，利税超过200亿，从业人数8.3万人，比2006年就业人数增加约110%，如图1-6所示。2008年中国光伏产业销售额接近2000亿元，从业人数接近20万人。中国光伏市场一旦启动，不仅将会创造千万亿元的内需市场，而且由于光伏产业人才的巨大缺口将增加数百万个相关就业岗位（如光伏生产线操作、光伏产品测试、光伏产品安装调试维护、光伏产品销售、光伏产品研发、光伏系统设计等）。以江西省为例，该省近年来大力发展光伏产业，发展势头非常迅猛，2009年产值200亿，2010年产值达到400多亿，目前全国排名第二，仅次于江苏省。而且，在江西省鄱阳湖生态经济区发展规划中，新能源产业（实际上主要是光伏产业）是八大主要建设产业之一，已被列为江西三大超千亿元产业建设项目。在人才需求方面，仅江西新余未来3年就有8万光伏产业人才的缺口，太阳能光伏方向的就业前景非常乐观。随着社会的发展和技术的进步，太阳能光伏发电的规模将不断扩大，成本也将逐步降低，光伏产业的社会效益和经济效益越显著。

表 1-1 全球光伏产业雇用人数预测/人

年度	安装	生产	批发	研发	供应	总计
2007	77888	22988	6890	2986	8613	119145
2010	220162	62548	18764	8131	23455	333058
2015	559282	147373	44212	19159	55265	825292
2020	16632586	393530	118059	51159	147574	2342907
2025	3877742	839338	251801	109114	314752	5392747
2030	7428118	1406841	422052	182889	527585	9967486

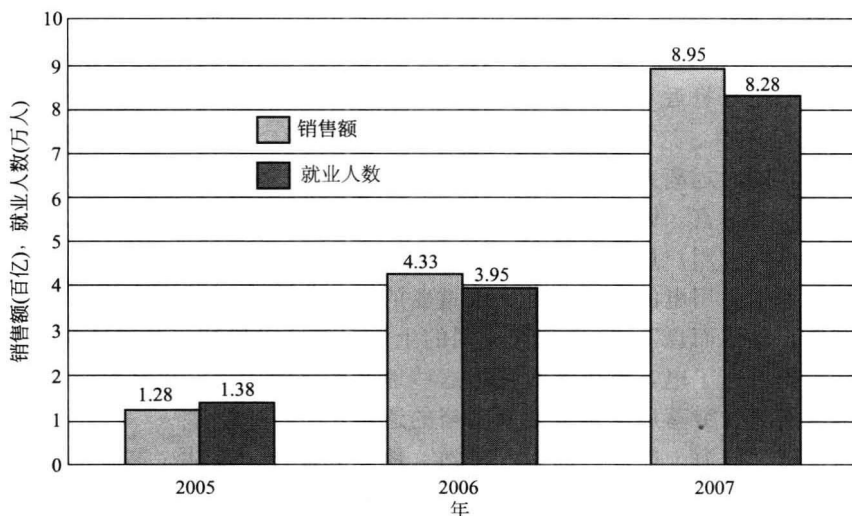


图 1-6 中国光伏产业带来的经济效益和社会效益

## 1.2 太阳能与太阳辐射

### 1.2.1 太阳能

太阳是距离地球最近的一颗恒星，也是太阳系的中心天体，位于离银河系中心约3万年，它的质量占太阳系总质量的99.865%。太阳的体积和质量分别是地球的130万倍和33万倍，平均密度为地球的1/4。太阳主要组成气体为氢（约80%）和氦（约19%）。由于太阳内部持续进行着剧烈的由氢聚变成氦的热核反应，以 $E=mc^2$ （ $m$ 为物质的质量， $c$ 为光速）的关系进行质能转换（1g物质可转化为 $9 \times 10^3$ J能量），以电磁波的形式不断地向宇宙空间释放出巨大的能量。由核聚变可知，氢聚合成氦在释放巨大能量的同时，每1g质量将亏损0.00729。根据目前太阳产生核能的速率估算，其氢的储量足够维持600亿年，因此太阳能可以说是“取之不尽、用之不竭”的能源。

太阳每秒释放出的能量是 $3.865 \times 10^{26}$ J，相当于每秒燃烧 $1.32 \times 10^{16}$ 吨标准煤所产生的能量。由于太阳与地球的平均距离约1.5亿千米，太阳辐射的能量大约只有22亿分之一到达地球，但已高达 $173 \times 10^4$ 亿千瓦，也就是说太阳每秒照射到地球上的能量就相当于500万吨煤。进入地球的太阳辐射约19%被大气吸收，约30%被大气层反射、散射和地面反射回宇宙空间，穿过大气到达地球表面的太阳辐射能约占51%，达到 $81 \times 10^4$ 亿千瓦，如图1-7所示。由于地球表面大部分被海洋覆盖，到达陆地表面的太阳辐射能只占到达地球表面的10%（ $17 \times 10^4$ 亿千瓦），这个能量相当于全球1年内消耗总能量的3.5倍；每年到达地球陆地上的太阳辐射能量约27万亿吨标准煤，是目前世界能源消费总量的2000多倍。

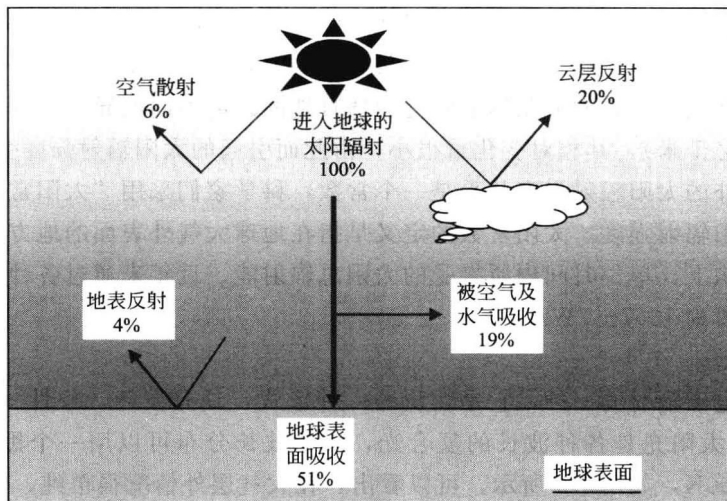


图 1-7 进入地球的太阳辐射能吸收情况

### 1.2.2 太阳辐射

#### (1) 太阳常数

地球是太阳系八大行星之一，地球在自转的同时围绕太阳旋转。昼夜是由于地球自转而产生的，自转方向自西向东，每转一周为一昼夜（24h）；而季节是由于地球的自转轴与地球围绕太阳公转的轨道的转轴呈 $23^{\circ}27'$ 的夹角而产生的，地球围绕太阳公转一圈的时间大约

是 365 天（一年），因此地球上才有了春夏秋冬四季的变化，如图 1-8 所示。每天中午时分，太阳的高度总是最高。在热带低纬度地区（即在赤道南北纬度  $23^{\circ}27'$  之间的地区），一年中太阳有两次垂直入射；在较高纬度地区，太阳总是靠近赤道方向；在北极和南极地区（在北半球大于  $90^{\circ}\sim 23^{\circ}27'$ ），冬季太阳低于地平线的时间长，而夏季则高于地平线的时间长。

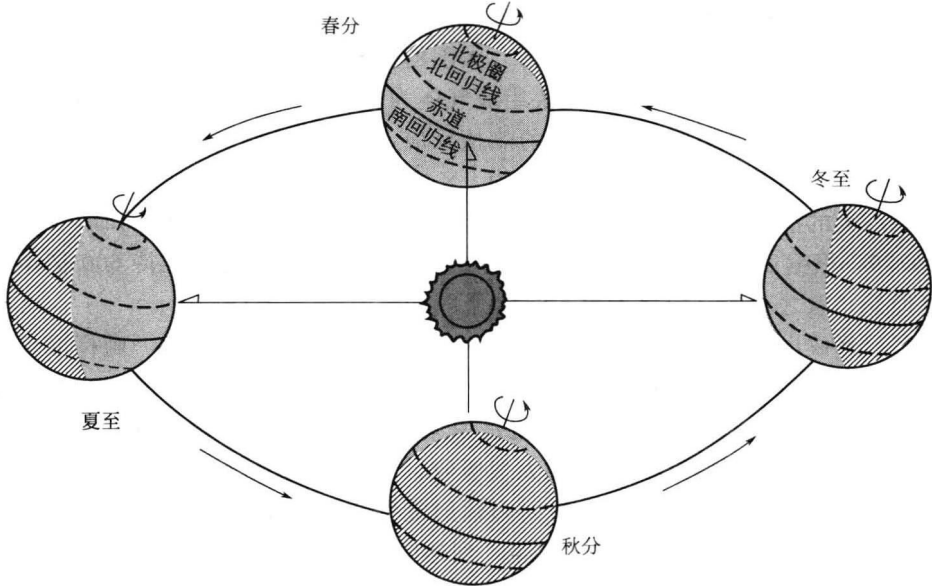


图 1-8 地球绕太阳运行的示意图

由于地球以椭圆形轨道绕太阳运行，因此太阳与地球之间的距离不是一个常数，而且一年里每天的日地距离也不一样。众所周知，某一点的辐射强度与距辐射源的距离的平方成反比，这意味着地球大气上方的太阳辐射强度会随日地间距离不同而异。然而，由于日地间距离太大（约 1.5 亿千米），其相对变化量很小，由此而引起的太阳辐射强度变化也是很小的。所以地球大气层外的太阳辐射强度几乎是一个常数，科学家们采用“太阳常数”来描述地球大气层上方的太阳辐射强度。太阳常数的定义是指在地球大气外表面的地方，与太阳光束方向垂直的单位面积上，单位时间内所接受的太阳总辐射能。近年来通过各种先进手段测得的太阳常数的标准值为  $1367\pm 7\text{W}/\text{m}^2$ 。

## (2) 太阳光谱

太阳辐射是电磁辐射的一种，它是物质的一种形式，具有波粒二象性（既具有波动性，也具有粒子性）。太阳光是各种波长的复合光，它的波长分布可以用一个黑体辐射来模拟，黑体的温度为 5800K，如图 1-9 所示。可以看出，在大气层外情况很单纯，太阳光谱几乎相当于 5800K 的黑体辐射光谱；在地面上，由于太阳光透过大气层后被吸收掉一部分，这种吸收和大气层的厚度及组成有关，结果导致非常复杂的光谱分布。

太阳辐射光谱的主要波长范围为  $0.15\sim 4\mu\text{m}$ ，在这个波长范围内又可分为三个主要区域，即波长较短的紫外光区（ $<0.39\mu\text{m}$ ）、波长较长的红外光区（ $>0.77\mu\text{m}$ ）及介于二者之间的可见光区（ $0.39\sim 0.77\mu\text{m}$ ）。太阳辐射的能量主要分布在可见光区和红外光区，如表 1-2 所示，可见光占太阳辐射总量的 50%，红外光占 43%，紫外光的太阳辐射能很少，只占总能量的 7%。其中，在波长  $0.48\mu\text{m}$  处太阳辐射的能力达到最高值。

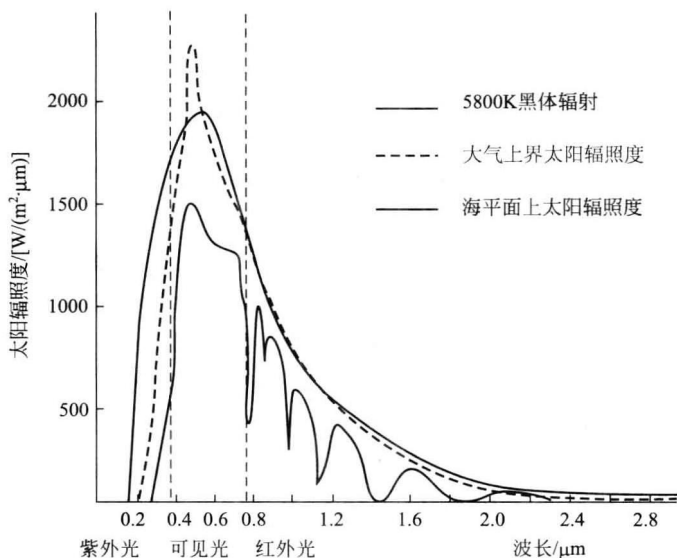


图 1-9 太阳光谱曲线分布图

表 1-2 大气外层太阳光谱分布表

光线类别	波长/ $\mu\text{m}$	照射强度/ $(\text{W}/\text{m}^2)$	比例
紫外线	$<0.39$	95.69	7%
可见光	$0.39\sim 0.77$	683.5	50%
红外线	$>0.77$	587.81	43%
总计		1367	100%

### (3) 大气质量

到达地面太阳辐射会受到大气层厚度影响。大气质量是一个无量纲量，它是太阳光线穿过地球大气的路径与太阳光线在天顶角方向时穿过地球大气路径之比。如图 1-10 所示， $A$  为地球海平面上一点， $O$  及  $O'$  为大气上界的点。太阳在天顶位置  $O$  时，太阳光线路程  $OA$  为大气质量 1；太阳位于  $O'$  时，大气质量为

$$AM = \frac{O'A}{OA} = \sec\theta_z = \frac{1}{\sin h} \quad (1-1)$$

式中， $\theta_z$  是太阳天顶角，即太阳光与本地垂线的夹角； $h$  为太阳高度角，且满足  $\theta_z + h = 90^\circ$ 。式(1-1)是从三角函数关系推导出来的，且忽略了折射和地面曲率等影响。从式(1-1)可以看出，大气质量越大，说明光线经过大气的路程越长，受到的衰减越多，到达地面的能量就越少。国际上规定，在 1 个标准大气压和  $0^\circ\text{C}$  时，海平面上太阳垂直入射时大气质量  $AM=1$ 。显然，地球大气上界的大气质量为 0。太阳在其他位置时，大气质量都大于 1，如当  $\theta_z = 48.2^\circ$  时， $AM=1.5$ ；当

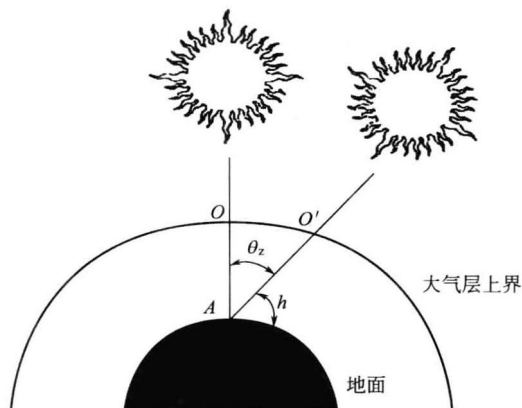


图 1-10 大气质量示意图

$\theta_2 = 60^\circ$ 时,  $AM=2$ 。目前国内外的标准都规定, 在晴朗的气候条件下, 当太阳透过大气层到达地面所经过的路程为大气层厚度的 1.5 倍时, 其光谱为标准地面太阳光谱, 简称 AM1.5 标准太阳光谱。此时太阳的天顶角为  $48.2^\circ$ , 原因是这种情况在地面上比较有代表性。

#### (4) 大气透明度

在大气层外, 太阳光在真空中辐射, 没有任何漫射现象, 全部太阳辐射都直接从太阳照射过来。地面上的情况则不同, 太阳辐射穿过大气层到达地面时, 由于大气中空气分子、水蒸气和尘埃等对太阳辐射的吸收、反射和散射, 不仅使辐射强度衰减, 还会改变辐射的方向和辐射的光谱分布。因此实际到达地面的太阳辐射通常是由直射和漫射两部分组成。

直射是指直接来自太阳, 其辐射方向不发生改变; 漫射则是被大气反射和散射后方向发生了改变的太阳辐射, 它由三部分组成: 太阳周围的散射(太阳表面周围的天空亮光)、地平圈散射(地平圈周围的天空亮光)及其他天空散射辐射。直射辐射和漫射辐射两部分合起来称为总辐射。漫射辐射的变化范围很大, 当天空晴朗无云时, 漫射辐射为总辐射的 10%; 但当天空乌云密布见不到太阳时, 总辐射则等于漫射辐射; 在正常的大气条件下, 直接辐射占总辐射的 75% 以上。

太阳辐射能在通过大气层时会产生一定的衰减, 表征大气对辐射衰减程度的一个重要参数就是大气透明度。如图 1-10 所示, 当太阳位于天顶位置  $O$  点时, 在大气层上界太阳辐射通量为  $I_0$ , 而达到地面后为  $I$ , 则大气透明度系数  $P=I/I_0$ ,  $P$  值表明太阳辐射通过大气层后的消弱程度。在晴朗无云的天气, 大气透明度高, 达到地面的太阳辐射能就多; 在天空中云雾、风沙、灰尘较多时, 大气透明度低, 达到地面的太阳辐射能就少。

显然地球上不同地区、不同季节、不同气象条件下到达地面的太阳辐射强度都是不相同的。表 1-3 给出了热带、温带和比较寒冷地带的太阳平均辐射强度。通常根据各地的地理和气象情况已将到达地面的太阳辐射强度制成各种可供工程使用的图表, 它们不但对太阳能利用, 而且对建筑物的采暖、空调设计也是至关重要的数据。

表 1-3 不同地区太阳平均辐射强度

地区	太阳平均辐射强度	
	$(\text{kW} \cdot \text{h})/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$	$\text{W}/\text{m}^2$
热带、沙漠	5~6	210~250
温带	3~5	130~210
阳光较少地区(北欧)	2~3	80~130

### 1.2.3 太阳能资源分布

#### (1) 世界太阳能资源分布

地球上太阳能资源的分布与各地的纬度、海拔高度、地理状况和气候条件有关。资源丰度一般以全年总辐射量 [单位为  $\text{kcal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$  或  $\text{kW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ] 和全年日照总时数表示。就全球而言, 美国西南部、非洲、澳大利亚、中国西藏、中东等地区的全年总辐射量或日照总时数最大, 为世界太阳能资源最丰富地区, 如图 1-11 所示。

#### (2) 中国太阳能资源分布

中国也是世界上太阳能资源较丰富的国家之一, 全国总面积 2/3 以上地区年日照时数超



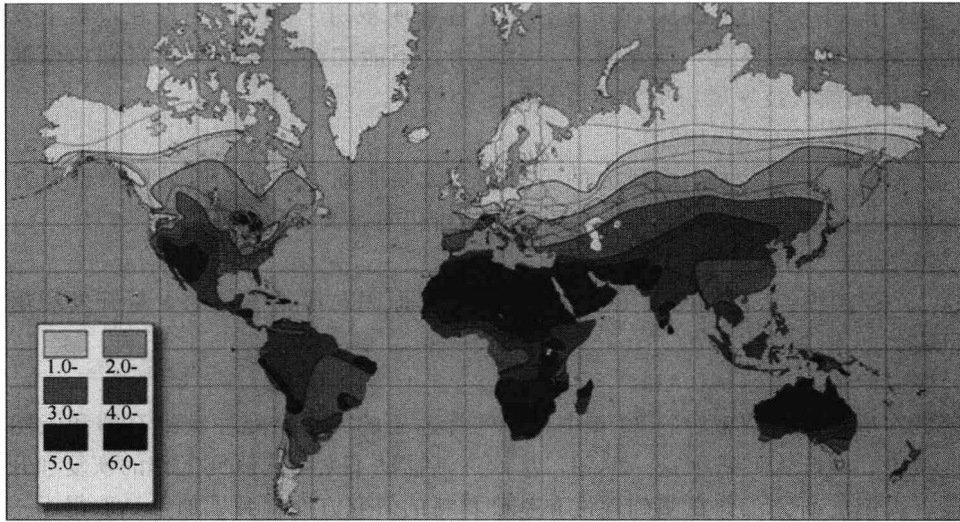


图 1-11 世界太阳能资源分布

过了 2000h, 年辐射总量大于  $5.02 \times 10^6 \text{ kJ/m}^2$ , 特别是西部地区年日照时间达到 3000h 以上。其中, 太阳能分布最丰富的是青藏高原地区, 可与地球上最好的印巴地区相媲美; 内蒙古、宁夏、甘肃、新疆等西部地区的光照资源也很丰富; 中国东部、南部、及东北为太阳能资源中等区; 四川盆地、两湖地区、秦巴山等地则是太阳能资源低值区。此外, 太阳日照时数的长短受所在地区纬度、季节、地形及天空状况等因素影响, 实际观测的日照时数一般比可能辐射的时数少。表 1-4 为中国各地区的年照时间数及年辐射总量。

表 1-4 中国各地区太阳能资源分类

类型	地区	年照时间数/h	年辐射总量/ [kcal/(cm <sup>2</sup> · a)]
1	西藏西部、新疆东南部、青海西部、甘肃西部	2800~3300	160~200
2	西藏东南部、新疆南部、青海东部、宁夏南部、甘肃中部、内蒙古、山西北部、河北西北部	3000~3200	140~160
3	新疆北部、甘肃东南部、山西南部、山西北部、河北东南部、山东、河南、吉林、辽宁、云南、广东南部、福建南部、江苏北部、安徽北部	2200~3000	120~140
4	湖南、广西、江西、浙江、湖北、福建北部、广东北部、山西南部、江苏南部、安徽南部、黑龙江	1400~2200	100~120
5	四川、贵州	1000~1400	80~100

### 1.3 太阳能的利用

据记载, 人类利用太阳能已有 3000 多年的历史。传说阿基米德曾经利用聚光镜反射阳光, 烧毁了来犯的敌舰。中国早在战国时期就已经懂得用金属做成凹面镜聚集太阳光来点火, 以后又有了玻璃放大镜来聚光取火; 人们还利用太阳能来干燥农副产品 (如谷物、小麦)。然而, 将太阳能作为一种能源和动力加以利用, 只有 300 多年的历史; 真正将太阳能作为“近期急需的补充能源”, “未来能源结构的基础”, 则是近来的事。