



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

太阳能照明

Solar Lighting

(印度) Ramchandra Pode

(加拿大) Boucar Diouf

吕毅军 高玉琳 朱丽虹 陈忠 施天谟

著
译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

太阳能照明

(印度) Ramchandra Pode 著

(加拿大) Boucar Diouf

吕毅军 高玉琳 朱丽虹 陈 忠 施天谟 译

机械工业出版社

本书从清洁能源出发,围绕太阳能光伏、LED/OLED 这两种清洁能源和绿色光源进行了详细的讨论,深入浅出地介绍了太阳能光伏系统和 LED、OLED 的基本理论和工艺技术,并以图文并茂的形式详述了太阳能照明系统集成、标准、存在的障碍及其未来的发展等问题。同时还针对我国西藏、坦桑尼亚等地区使用太阳能驱动照明案例进行调研与分析。

本书内容丰富,可供物理、材料、工程等相关专业的照明科技工作者以及照明产业界等多层次人员参考。

Translation from English language edition:

Solar Lighting

by Ramchandra Pode and Boucar Diouf

Copyright © 2011, Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社出版,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字:01-2012-4652 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能照明/(印)波德(Pode, R.), (加)迪乌夫(Diouf, B.) 著;
吕毅军等译. —北京:机械工业出版社, 2014. 8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Solar Lighting

ISBN 978-7-111-47657-3

I. ①太… II. ①波…②迪…③吕… III. ①太阳能—照明设计
IV. ①TU113. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 186750 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

版式设计: 霍永明 责任校对: 张玉琴

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 10 印张 · 145 千字

0001—2800 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47657-3

定价: 48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

能源向来是困扰经济发展的难题，节约能源、保护全球环境已成为全人类的共识。开源与节流一直是人类解决能源问题的主要途径。随着全球气候变暖的日益严重和“可持续发展”观念逐渐深入人心，太阳能逐渐受到世界各国的关注。太阳能取之不尽，适用范围广，既可免费使用，又无需运输，对环境无污染，为人类创造了一种新的生活形态，是一种可持续使用的绿色能源。我国的太阳能资源非常丰富，理论储量达到每年 17000 亿吨标准煤，太阳能资源开发利用的潜力非常广阔。对太阳能的开发利用，对于保障能源安全、保护生态环境、实现可持续发展，具有重要意义。

提及太阳能利用技术，我们首先想到的可能是太阳能光伏发电。太阳能光伏发电应用广泛，其中照明就是主要应用之一。照明是当今能源消耗的一个主要部分，现阶段全球照明占电力消耗的比重达 19%，耗能总量达到 2651TWh。人类照明历经原始的火把，油灯，电灯，发展至以发光二极管（LED）为代表的固态照明。LED 具有体积小、寿命长、光效高、功耗低以及无汞污染等诸多优点，成为各国争相发展的新一代绿色照明光源。2014 年 3 月，美国 LED 巨头科锐（CREE）公司发布的白光功率 LED 的光效已达 303lm/W，远远超过其他类型照明光源的光效。有机发光二极管（OLED）虽然在光效、寿命方面还不如 LED，但以其柔性、超薄、透明、重量轻、适合大面积发光等优点在下一代照明应用中独具特色。太阳能光伏发电作为可靠的可再生能源与 LED/OLED 的结合是解决电网未能覆盖的偏远地区最有效的离网照明方案。

《太阳能照明》一书既涉及太阳能光伏、LED 和 OLED 的基本理论和工艺技术，又拓展到系统集成、标准、多国实际应用的案例分析。本书以生动易懂的语言详细地介绍了如何利用太阳能进行发电的主要技术，以及 LED 和 OLED 的原理、应用等相关知识；并以图文并茂的形式以及生动翔实的实例分析了各种太阳能照明技术的经济学、存在的障碍及其可接受性评估。本书内容丰富，可供物理、材料、工程等相关专业的照明科技工作者以及照明产业界等多层次人员参考。本书的翻译出版希望能够助广大太阳能照明技术领域的设计、开发和生产、应用等相关技术人员一臂之力，为我国的太阳能技术、节能环保照明技术尽一份绵薄之力。

本书的翻译主要由吕毅军、高玉琳、朱丽虹完成。另外，参与本书部分翻译工作和资料整理等相关工作的还有陈忠教授、施天谟教授，郭自泉、张纪红、卢

红丽等研究生。书中少量专有名词国内尚无统一译法，有些组织机构、公司及网站在国内没有统一或者相应的称呼，我们参考大量资料，力求准确译出，为避免读者产生歧义，仍然保留原英文名称。另外，由于译者水平所限，疏漏、错误和不妥之处在所难免，希望广大读者不吝指正。

译 者

于厦门大学嘉庚四

2014 年 7 月

前 言

进入 21 世纪，电作为人类最基本的需求，其发展仍然十分不平衡。众多的发展中国家面临着发达国家一般不会存在的电力缺乏问题；然而，其发展所依赖的能源主要是基于化石燃料，化石燃料对环境的影响引起了越来越多的关注。

为了改善这种局面，真正地保护环境，可再生能源是一个较好的选择。但除非得到政府在政策上的大力支持与深入推广，否则可再生能源的利用难以得到贯彻执行。可再生能源不是奢侈品，而是降低成本的替代品，它在提高人们生存条件的同时，还可带来新的工作机会。

联合国千年发展计划的目标之一就是为全球 14 亿人（大部分位于农村）提供正常的电力。完善的电力与家庭照明被认为是体面生活的必要条件。然而在一些农村地区则缺乏安全、持续的电力供应，而安全稳定的电力也是各种经济开发不可或缺的基础设施。对一些发展中国家来说，电网扩展是一项重要目标，但其成本昂贵且不可在短期内实现。然而，对于许多农村地区，地处偏远，电力需求较低，使得扩展的电网也难以企及。因此，自主的离网发电系统，如光伏和风能，对这些偏远的农村地区来说或许是最合适的选择。

本书内容源自多年来在无机和有机 LED 照明的深入研究以及家用太阳能系统的实践。本书也全面展示了过去几年来相关文献在这方面研究的最新进展。本书的大部分内容是基于家用太阳能系统与未来的节能照明器件如 LED 与 OLED 的实际应用。

我们要感谢首尔庆熙大学物理系和信息显示系的同事们给予的开放而热情的讨论以及在 LED 照明与光伏系统研讨会上的参与。Syed Abdus Samad 教授，前韩国外国语大学工商管理分部教授，现孟加拉国达卡政府投资委员会执行主席，在我们关于加强太阳能 LED 照明与能源安全方面可接受性研究论文的写作中给予了有价值的建议与投入，现在这些内容也是本书的组成部分，在此一并致谢。

我们相信，在未来几年内高效节能照明设备与家用太阳能系统的应用将显著增长。我们期望本书能供学术界、商业界及可再生能源工程团体作为教科书或参考书。

2011 年 6 月于首尔
Ramchandra Pode
Boucar Diouf

目 录

译者序

前言

第1章 发展清洁能源的原因	1
1.1 引言	1
1.2 目前的能源结构方案	2
1.3 气候变化	6
1.4 环境与健康	8
1.5 可再生能源	10
1.6 CO ₂ 排放量估计	14
1.7 小结	14
参考文献	15
第2章 太阳能光伏发电	17
2.1 太阳能	17
2.1.1 太阳能光伏发电	17
2.1.2 光子: 能量、波长和频率	18
2.1.3 太阳光谱	19
2.2 太阳电池	20
2.2.1 无机太阳电池的结构	20
2.2.2 光伏太阳电池的特点	21
2.2.3 光伏太阳电池的理论电流-电压特性	22
2.2.4 短路电流	23
2.2.5 开路电压	23
2.2.6 最大功率	24
2.2.7 填充因子	24
2.2.8 光伏太阳电池的效率	25
2.2.9 并联电阻 R_{sh} 和串联电阻 R_s	25
2.2.10 温度影响	26

2.2.11 薄膜太阳电池	27
2.2.12 有机太阳电池	28
2.3 太阳电池板	29
2.3.1 从太阳电池到太阳电池板	29
2.3.2 太阳电池模块的 I - V 特性	32
2.3.3 太阳电池板的大小	32
2.3.4 太阳电池板的定位	32
2.3.5 太阳辐射数据	32
2.4 光伏系统	36
2.4.1 标准的独立光伏系统	36
2.4.2 太阳能充电控制器	37
2.4.3 逆变器	39
2.4.4 电池	42
2.4.5 独立光伏系统的选择	44
2.4.6 并网光伏发电系统	47
2.5 太阳能发电和农村电气化	47
参考文献	49
第3章 发光二极管	51
3.1 光度量和辐射度量	51
3.1.1 辐照度	51
3.1.2 辐亮度	51
3.1.3 发光强度	51
3.1.4 亮度	51
3.1.5 光通量	51
3.1.6 衡量照明水平的单位: 照度	52
3.1.7 户外常见的自然照明水平	52
3.1.8 在不同工作空间的推荐照明水平	54
3.1.9 发光效能	54
3.1.10 平方反比定律	55
3.2 半导体和 p-n 结	56
3.3 发光二极管 (LED) 与照明技术	58
3.3.1 LED	58
3.3.2 LED 材料及其发展	60

3.3.3 肖克莱二极管方程	62
3.3.4 LED 的电流-电压特性	62
3.3.5 LED 的驱动	63
3.3.6 交流驱动 LED	63
3.3.7 大功率 LED	64
3.3.8 LED 灯	65
3.3.9 Haitz 定律	68
3.3.10 LED 灯	69
3.3.11 LED 基本电路	70
3.3.12 太阳能 LED 路灯	71
3.4 其他电光源	73
3.4.1 白炽灯光源	73
3.4.2 荧灯光光源	74
3.4.3 高强度放电灯	75
3.4.4 低压钠灯	75
参考文献	76
第 4 章 有机发光二极管 (OLED) 照明技术	77
4.1 简介	77
4.2 白光 OLED 备受关注的原因	77
4.3 OLED 概述	78
4.3.1 OLED 发光原理	78
4.3.2 OLED 种类	80
4.4 OLED 光源的基本特性	86
4.4.1 光学特性	86
4.4.2 颜色问题	86
4.5 白光 OLED	87
4.6 OLED 制作工艺	88
4.7 白光 OLED 的实现方法	90
4.7.1 叠层白光 OLED	92
4.7.2 单层白光 OLED	93
4.7.3 颜色转换白光 OLED	93
4.8 OLED 照明技术问题	94
4.8.1 发光效能	95

4.8.2 低驱动电压	95
4.8.3 颜色特性	95
4.8.4 寿命	96
4.8.5 成本	96
4.8.6 封装	96
4.9 大面积涂层技术	99
4.9.1 喷墨打印技术	99
4.9.2 旋转涂布过程	99
4.9.3 卷对卷印刷技术	100
4.10 OLED 照明应用	100
4.11 OLED 行业标准	101
4.12 白光 OLED 照明制造商的发展趋势	103
4.12.1 Philips 公司 (欧洲)	104
4.12.2 OSRAM 公司 (欧洲)	104
4.12.3 General Electric 公司 (美国)	105
4.12.4 Fraunhofer 公司 (欧洲)	105
4.12.5 Novalled 公司 (欧洲)	106
4.12.6 Add-Vision 公司 (美国)	106
4.12.7 UDC (美国)	106
4.12.8 Konica Minolta 公司 (日本)	107
4.12.9 Lumiotec 公司 (日本)	107
4.12.10 Canon/Tokki 公司 (日本)	108
4.12.11 DNP 公司 (日本)	108
4.12.12 Sumitomo 公司 (日本)	108
4.12.13 Toppan Printing 公司 (日本)	108
4.12.14 Kodak 公司 (美国)	109
4.12.15 Du Pont 公司 (美国)	109
4.12.16 Idemitsu Kosan 公司 (日本)	109
4.12.17 LG Chem 公司 (韩国)	109
4.12.18 Samsung Mobile Display 公司 (韩国)	110
4.12.19 Visionox 公司 (中国)	110
4.12.20 ModisTech 公司 (韩国)	111
4.12.21 Panasonic 公司 (日本)	111
4.12.22 AIXTRON 公司 (欧洲)	111

4.12.23 Mitsubishi 公司 (日本)	111
4.12.24 Kaneka 公司 (日本)	112
4.13 OLED 照明技术路线图	112
4.14 小结	113
参考文献	115

第5章 太阳能驱动的 LED 照明的可接受性 124

5.1 引言	124
5.2 煤油燃料照明	124
5.2.1 对健康的影响	125
5.2.2 煤油引起的火灾危险	125
5.2.3 对环境的影响	125
5.2.4 对产生收入的活动的影响	126
5.3 太阳能驱动照明	126
5.3.1 太阳能驱动的紧凑型荧光灯 (CFL)	126
5.3.2 太阳能驱动 LED 照明	128
5.4 LED 照明的经济性	131
5.5 西藏太阳能驱动 LED 的实例研究	131
5.5.1 项目的一些发现	132
5.5.2 对于太阳能家居系统的反应	132
5.6 消费者接受太阳能驱动照明的限制因素	133
5.6.1 坦桑尼亚太阳能光伏发电技术限制因素现状研究	133
5.6.2 博茨瓦纳的太阳能家居系统现状研究	133
5.6.3 摩洛哥的情况研究	134
5.6.4 埃及和津巴布韦的情况研究	134
5.6.5 印度的情况研究	135
5.6.6 老挝万象的情况研究	135
5.6.7 菲律宾的 USAID 项目	136
5.7 太阳能驱动 LED 照明的接受度	136
5.7.1 商业模式	136
5.7.2 消费者模式	138
5.7.3 能源中心	139
5.8 太阳能 LED 系统的融资	139
5.8.1 在非洲融资的最佳实践	140

5.8.2 在亚洲融资的最佳实践	140
5.8.3 信用担保体系	141
5.9 小结	141
参考文献	141
附录	143
附录 A 有机材料供应商	143
附录 B 商业化 OLED 照明面板成本	143
附录 C 农村地区一个典型家庭用的 LED 太阳能家居系统 (SHS)	144

第 1 章 发展清洁能源的原因

1.1 引言

能源在任何一个国家的经济增长、进步与发展、消除贫困、国家安全中扮演着最重要的角色。对所有国家来说，不间断的能源供应是一个至关重要的问题。未来经济增长的关键依赖于负担得起的、容易获得的、环保的、长期可用的能源。如图 1.1 所示，安全问题、气候变化和公共健康都严重依赖于能源。丰富的、廉价的、清洁的能源是人们过上体面生活的条件，也是社会经济健康发展的一个先决条件。近几十年，经济的快速发展导致了日益增长的能源需求^[1-4]，如此一来，更加增大了温室气体（GHG）的排放。由于石油和天然气的缺乏，在 1973 年和 1979 年全球分别经历了第一次和第二次能源危机。

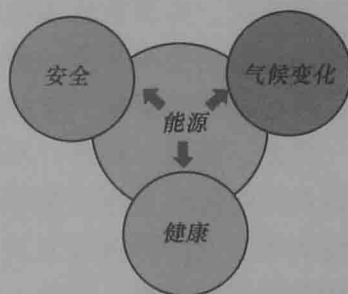


图 1.1 能源对安全、气候变化和公共健康的影响

根据最近的国际能源署（IEA）世界能源展望报告，全球 20% 以上的人口或 14 亿人无法获得电力供应^[5,6]。全球近 40% 的人口或 27 亿人，主要是在农村地区，烹饪食物依靠传统的生物质能。为了满足这数十亿远离电网人口日益增长的需求，全球范围内能源部门的开发活动预计将加速。未来 20 年，全球能源需求预计将增加 50%，主要是因为发展中国家中数亿人将要买车，将会过更高能耗的生活。未来的能源需求预测如图 1.2 所示。化石燃料的产量，特别是石油，将难以满足人们的需求。即使化石燃料能满足需求，也将造成不可逆的气候改变。目前，人类 80% 的能源来自化石燃料，比如煤、石油和天然气，只有 2% 来自风能和太阳能。因此在我们需要越来越多能源的时候，有必要改变我们使用能源的种类。

能源的匮乏，不仅可能危及一些国家的经济发展，而且还可能危及国家的安全和战略利益。消费者需要足够的、经济的、清洁的、可持续的和绿色的燃料。因此有必要设想一个新的能源模式，在这种模式下，经济可持续增长，工业得到发展而又不危及气候。

关于一次能源还有一点值得关注，就是能源的不间断供应以及能源安全性，

这已引起一些发展中国家以及发达国家的重视。事实上，这个问题很急迫，需要更认真地加以解决，因为一次能源只集中在少数几个国家。不幸的是，作为能源来源的一次能源并不是均匀地分布在世界各地。事实上，近期一些国家因全球价格波动、日益激烈的竞争、地缘政治的风险而很无奈地被边缘化。近年来基于对能源安全的密切关注，发展中国家和发达国家获得海外能源资源的竞争已明显加剧。此外，环境污染在许多方面影响着我们的健康，空气污染造成以下方面的疾病：①呼吸系统疾病；②胃肠问题；③皮肤问题；④眼睛问题；⑤心脏问题；⑥其他健康问题。一些贫穷的国家不能像发达国家那样拥有一个健全的医疗保健系统，大多数远离电网的农村居住者因空气污染得了病。劳动力健康的不良状态将严重影响国家的经济增长。

因此，能源、经济、环境和气候变化以及医疗保健是相互关联的。为了未来经济和工业的可持续发展，这些问题必须共同得到解决。此外，为了避免下一次能源危机，解决环境问题，现有的突破口就是探讨诸如节能技术和新的可再生能源技术等问题。

本章分别讨论了传统的能源及其对健康、环境和气候变化的影响，同时讨论了能源结构的安全性和多样化，还讨论了能源结构互换的可行性、使用替代燃料以及二氧化碳排放量的估计等问题，并得出结论。

1.2 目前的能源结构方案

国际能源署（IEA）在发布的《世界能源展望》中预测，全球一次能源需求从2007~2030年间每年增长1.5%，从12000Mtoe（百万吨油当量）以上增长到16800Mtoe，整体增幅达40%^[7]。图1.3显示了在能源结构参考方案中2008年^[8]和2030年^[9]的世界能源结构，此方案是根据目前的政策制定的。世界石油杂志指出：假设在这样的消费速率和经济状况下，全球的石油储量大约在43年内将被耗尽，煤大约可用417年，天然气可使用167年^[10]。按照目前的政策，IEA在参考方案中估计，总能源结构的规模预计将从2008年的11294.9Mtoe增加至2030年的17014Mtoe^[5]。化石燃料如煤、石油、天然气等仍然是全球一次能源的主要来源，它在2008~2030年期间的使用占整体增幅的50%。单从数字上来看，在预测期内，煤的需求增幅最大，其次是天然气和石油。尽管到2030

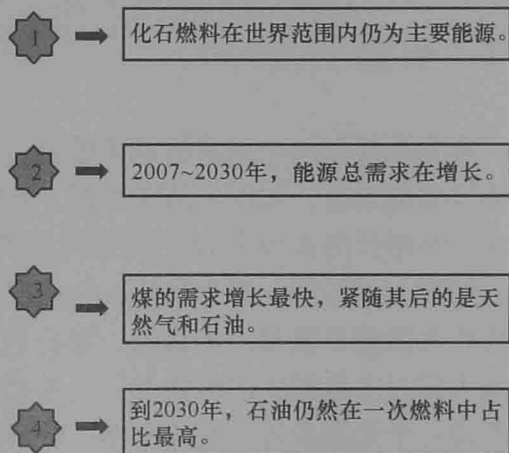


图 1.2 未来能源需求预测

年石油仍然是在一次能源结构中最主要的燃料，但其份额将从现在的 34% 下降至 30%。表 1.1 中列出了在能源结构中一些工业化国家和发展中国家^[8,11,12]。冰岛、挪威、瑞典和芬兰四个发达国家总能源结构中可再生能源的贡献分别是 73%、60%、26% 和 23%。然而，法国、瑞典、瑞士和比利时在其能源结构中核能源的份额分别为 40%、37%、24% 和 22%。有趣的是，冰岛的能源结构中具有全球最多的可再生能源（72.6%），而化石燃料仅为 27.4%。另一个极端是，美国在能源结构中的表现并不鼓舞人心，因为它强烈依赖于化石燃料（86%），而核能和可再生能源分别只占 8% 和 6%。此外，值得一提的依赖于化石燃料的国家还有澳大利亚（97%）、爱尔兰（97%）和印度尼西亚（97.8%），它们的经济几乎完全依靠化石燃料。这些结果表明能源模型在现实生活中应实行结构调整。

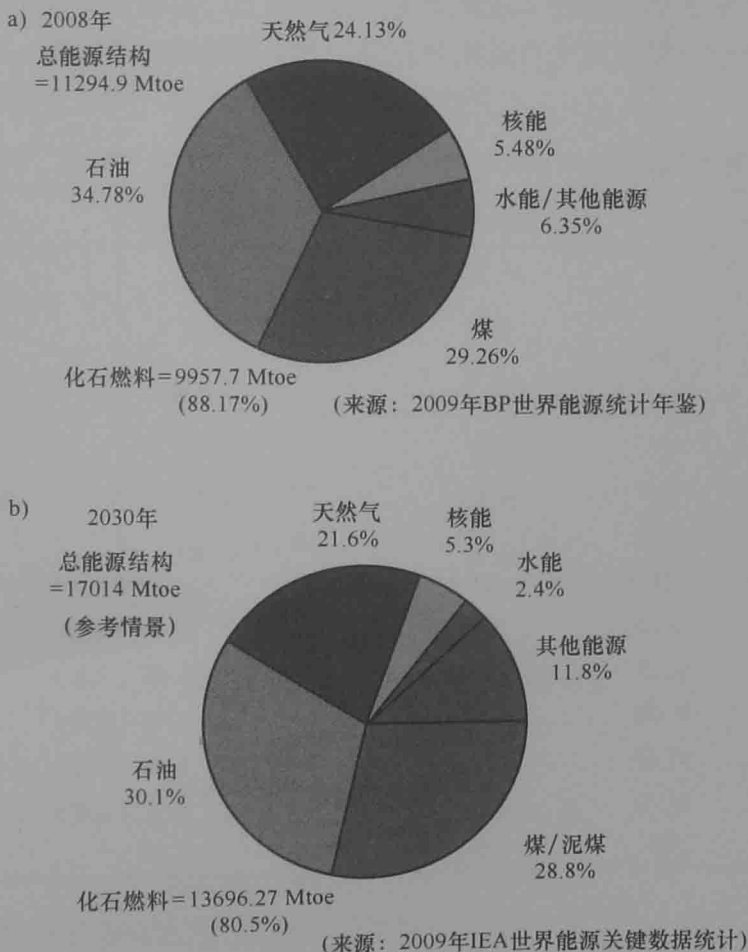


图 1.3 a) 2008 年世界能源结构, b) 基于目前能源政策的 2030 年参考情景

表 1.1 2008 年部分工业化及发展中国家能源结构

国 家	能 源 结 构				参 考 文 献
	化石燃料 (%)	核能 (%)	可再生能源 (%)	其他能源 (%)	
卢森堡	92	0	2	6	[11, 12]
美国	86	8	6	0	[11, 12]
澳大利亚	97	0	3	0	[11, 12]
加拿大	67	7	25	0	[11, 12]
芬兰	59	16	23	2	[11, 12]
比利时	75	22	2	1	[11, 12]
爱尔兰	97	0	2	1	[11, 12]
荷兰	94	1	3	2	[11, 12]
德国	84	12	4	0	[11, 12]
丹麦	85	0	14	1	[11, 12]
日本	83	12	5	0	[11, 12]
挪威	37	0	60	0	[11, 12]
奥地利	77	0	21	2	[11, 12]
英国	89	9	2	0	[11, 12]
意大利	90	0	7	3	[11, 12]
新西兰	71	0	29	0	[11, 12]
冰岛	28	0	73	0	[11, 12]
法国	52	40	6	2	[11, 12]
保加利亚	71	22	5	2	[11, 12]
葡萄牙	83	0	15	2	[11, 12]
瑞典	37	37	26	0	[11, 12]
瑞士	63	24	13	0	[11, 12]
巴西	62.45	1.36	—	36.08 (水能)	[8]
中国	92.6	0.77	—	6.61 (水能)	[8]
印度	92.82	0.80	—	6.06 (水能)	[8]
印度尼西亚	97.80	—	—	2.16 (水能)	[8]
韩国	85.32	14.22	—	0.37 (水能)	[8]
世界平均	87	6	6	1	—

图 1.4^[13]和表 1.2^[8]为全球石油储量分布概况。至 2008 年全球约 60% 已探明石油储量位于中东国家，而 57% 的天然气储量主要分布在俄罗斯、伊朗和卡塔尔三个国家，如图 1.5 和表 1.2 所示。而全球的煤炭储量除了如表 1.2 中列出的中东和南美国家外，全球分布较为均匀。中东和非洲国家有丰富的能源资源，

足以满足目前世界的能源需求。因此，许多发达国家和发展中国家在拉丁美洲、非洲和亚洲投资，以获得足够能源资源。事实上，最近一些国家在非洲的政治利益显示了它们对能源安全问题的关注。在主要能源生产地区，由于意外事件或自然灾害而使政治不稳定以及能源生产和分销链的断裂，进一步加剧了能源消费国的忧虑。个别消费国家将继续面临着特殊的能源安全问题，这些问题关系到成本、地理、政治及与生产者的关系等诸多因素。多元化的石油和天然气供应可能是许多国家的一个战略方针，它可以提高能源的安全性，但不解决气候变化问题。

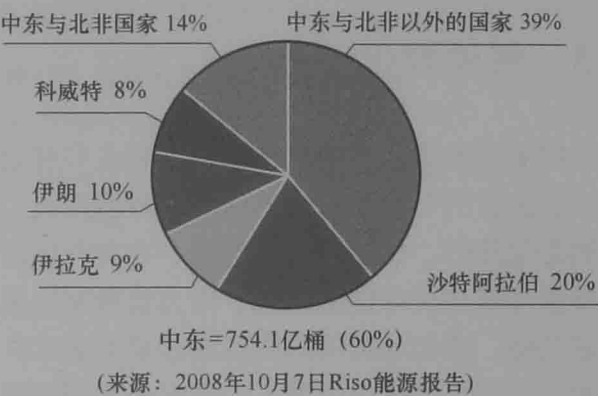


图 1.4 全球石油储量分布

表 1.2 至 2008 年全球已探明石油、天然气和煤（包括无烟煤和烟煤）

地 区	石油/10 亿桶	天然气/万亿 m ³	煤/亿吨
亚太地区	42.0	15.39	155.8
北美	70.9	8.87	246.1
中部和南部美洲	123.2	7.31	15.0
非洲	125.6	14.65	320.0
欧洲和欧亚大陆	142.2	62.89	272.2
中东	754.1	75.91	1.4

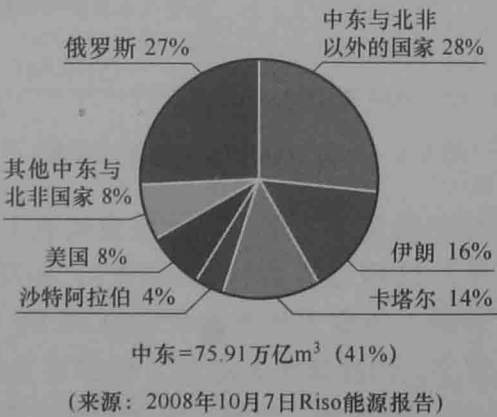


图 1.5 2008 年全球已探明天然气储量