



可再生能源系列

# 地热能

Geothermal Energy:  
Renewable Energy and the Environment

(第二版)

[美] William E. Glassley / 著  
王社教 闫家泓 李 峰 等 / 译



CRC Press  
Taylor & Francis Group

石油工业出版社

可再生能源系列

# 地 热 能

(第二版)

[美] William E. Glassley 著  
王社教 闫家泓 李 峰 等译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是一本关于地热能的基础读物,介绍了地热能的相关基础知识,包括地热能的来源、地热系统基本特征、地热资源的勘探开发及利用技术,论述了影响地热能使用中存在的水管理、排放物管控等内容,并讨论了地热能利用的经济和社会问题,强调了对地热资源的有序利用。

本书可作为地热能专业本科生课程以及地热资源设计师、规划师、工程师和建筑师的参考书籍,以及为政策制定者、投资者和监管机构提供背景材料来源。

### 图书在版编目(CIP)数据

地热能:第二版/(美)威廉·E.格拉斯利  
(William E. Glassley)著;王社教等译. — 北京:  
石油工业出版社,2017.8

书名原文:Geothermal Energy: Renewable Energy  
and the Environment (Second Edition)  
ISBN 978-7-5183-1952-7

I. ①地… II. ①威… ②王… III. ①地热能-基本  
知识 IV. ①TK52

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第177988号

Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment, Second Edition  
by William E. Glassley  
ISBN: 978-1-4822-2174-9

2015 by Taylor & Francis Group, LLC  
CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business All Rights Reserved  
Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor &  
Francis Group LLC.

本书经Taylor & Francis Group, LLC授权翻译出版并在中国大陆地区销售,简体中文  
版权归石油工业出版社有限公司所有,侵权必究。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and  
illegal. 本书封面贴有Taylor & Francis公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2016-0842

---

出版发行:石油工业出版社有限公司  
(北京安定门外安华里2区1号 100011)  
网 址:www.petropub.com  
编辑部:(010) 64523544  
图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店  
印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷  
787×1092毫米 开本:1/16 印张:20.5  
字数:500千字

---

定价:160.00元  
(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)  
版权所有,翻印必究

## 第二版前言

自本书第一版面世以来，世界和国际能源市场发生了重大变化。加上地热产业的技术成果丰硕，尤为重要是新技术的出现，影响了勘探及其效率，增强型地热系统的快速扩张和成功，以及新的钻井技术改变了获取资源的能力。对经济学和资源评价方面理解的深入，尤其对生命周期（对能源投资回报方法的分析）的关注，对全面观察能源生产和使用有重要作用。因此，决定对该书进行再版。



# 第一版前言

人类活动对环境的影响力快速增长改变了人类看待世界的方式以及人类与世界的关系。直到 20 世纪中叶，人们认为世界在本质上是稳定不变的。无论是对全球影响较小的变化还是受时间尺度限制的变化，地质学家比普通工人、政治家或是学生更熟悉这种变化。然而，在过去的 50 年中，工业活动的累积效应，以及人口增长和经济发展以复杂方式变得更加明显。我们现在已经有能力监测地球环境的各个方面，并且开始意识到世界及其生物以响应人类活动的方式在演化。

在人类主宰之下，已经能够获取和利用看起来无限的良性的化石能源。实际上，在意识到那些化石能源是可耗尽的并且影响了全球水圈、生物圈和大气圈之后，已经开始寻找和开发对环境影响更小且可持续的能源，地热能就是这样一种资源。地热能是无处不在、取之不尽用之不竭的，它驱动了横跨地球的大陆运动，融化了火山喷发形成的岩石，为生活在海洋深处的生物提供能量。地热能已存在 45 亿年，在数亿年之后仍将存在。地热能在地球中不断的流动，一天 24 小时，一周 7 天，雨天或晴天，永生永世永不停息。它有可能为世界上每一个国家提供电力，仅在美国，可用于发电的地热能超过国家电力消耗总量的数倍。所有这些都说明地热能的开发利用是可能的，而且其对环境的影响最小。

本书是一本关于地热能来自哪里，如何找到它，如何获得它，过去已经成功开发出的种种应用，以及在将来可以采取什么措施改善其使用的专著。本书还涉及影响地热能使用的限制——如何管理水、管控何种排放物以及何时是不正确的利用。最后，本书也讨论了经济和社会问题，强调明智和有序地发展这种耐用且丰富的资源。

本书适用于寻求深入了解地热能及其应用的读者，可作为本科生课程、设计师、规划师、工程师和建筑师的参考书籍，以及为政策制定者、投资者和监管机构提供背景材料。

明智地使用地热能有助于多方面解决全球面临的一项基本挑战——如何在确保健康、繁荣和社会安全的情况下获得能源。希望这本书将有助于实现这一目标。

# 致 谢

作者感谢以下人员，他们为本书提供了丰富的资料：俄勒冈理工学院地热中心的 Tony Boyd、内华达州里诺市 SpecTIR 公司的 Mark Coolbaugh、加利福尼亚州圣迭戈市 Imageair 股份有限公司的 Mariana Eneva、内华达州里诺市内华达大学地热能源大盆地中心的 Christopher Kratt、加利福尼亚州坎比 I' SOT 的 Dale Merrick、加利福尼亚州门洛帕克市美国地质调查局的 Colin Williams。感谢 Bill Bourcier, Elise Brown, Carolyn Cantwell, Judy Fischette, Andrew Fowler, Karl Gawell, Samuel Hawkes, James McClain, Dale Merrick, Curt Robinson, Peter Schiffman, Charlene Wardlow, Jill Watz 和 Maya Wildgoose 参与讨论。感谢 Adam Asquith, Tucker Lance 和 Gabriel Perez 提供科研帮助；Trenton Cladohous, Yini Nordin 和 Susan Petty 使关于增强型地热系统应用的讨论得到了实质性改进；Carolyn Feakes, Marcus Fuchs, Abbas Ghassemi, Joe Iovenitti 和 Robert Zierneberg 审查了这份手稿，大大改进了内容和呈现方式，感谢他们的评论。很多图表的起草是由 Ingrid Dittmar 熟练完成的。

# 作者简介

William E. Glassley 拥有超过 40 年的分析、建模和针对驱动地热系统及大陆演化地质过程的评估经验。获得了加利福尼亚大学圣迭戈分校文学学士学位和华盛顿大学理学硕士及博士学位。撰写和参与编写了超过 100 个学术和技术方面的相关报告和出版物。他是加利福尼亚大学戴维斯分校地球与行星科学系的高级研究员。

Glassley 博士也是加利福尼亚地热能源协会（加利福尼亚大学戴维斯分校能源系的一部分）的执行董事及丹麦奥胡斯大学的名誉研究员，并分别在华盛顿大学、米德尔伯里学院和劳伦斯利弗莫尔国家实验室拥有研究、教学和管理职务。他一直是美国国家科学基金会、欧盟委员会、国际原子能机构和一些国家的研究理事会中的科学评议小组成员之一。

Glassley 博士一直是国际科学期刊的审稿人，他的研究已经刊登在一些大众科学刊物上。他在奥斯陆大学的博士后研究被授予 G. Unger Vetlesen 基金会奖学金。

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 第1章 概述 .....                   | (1)  |
| 1.1 全球能源概览 .....               | (1)  |
| 1.2 可再生能源——地热能 .....           | (5)  |
| 1.3 电力需求和地热能的特征 .....          | (9)  |
| 1.4 小结 .....                   | (10) |
| 问题 .....                       | (11) |
| 参考文献 .....                     | (11) |
| 第2章 地热来源 .....                 | (13) |
| 2.1 地球热能的来源 .....              | (13) |
| 2.2 地球中热量的传递 .....             | (16) |
| 2.3 板块构造与地热资源的分布 .....         | (22) |
| 2.4 地热系统的地质背景分类 .....          | (25) |
| 2.5 地热能的可用性和开发利用 .....         | (27) |
| 2.6 小结 .....                   | (30) |
| 2.7 实例分析 .....                 | (30) |
| 问题 .....                       | (31) |
| 参考文献 .....                     | (32) |
| 附录 单位换算 .....                  | (34) |
| 第3章 热力学与地热系统 .....             | (36) |
| 3.1 热力学第一定律：热和功的等价性及能量转换 ..... | (36) |
| 3.2 热力学第二定律：熵增加的必然性 .....      | (38) |
| 3.3 吉布斯方程和吉布斯能 .....           | (43) |
| 3.4 热力学效率 .....                | (45) |
| 3.5 小结 .....                   | (46) |
| 3.6 案例分析：水的热力学性质和岩—水相互作用 ..... | (46) |
| 问题 .....                       | (51) |
| 参考文献 .....                     | (52) |
| 附录 静岩压力与静水压力 .....             | (52) |
| 第4章 地下流体流动：地热系统的水文特征 .....     | (54) |
| 4.1 地下流体流动的一般模式 .....          | (54) |
| 4.2 基质孔隙度和渗透率 .....            | (55) |
| 4.3 裂缝孔隙度和渗透率 .....            | (59) |
| 4.4 深度对孔隙度和渗透率的影响 .....        | (63) |
| 4.5 真实地热系统的水文特征 .....          | (64) |



|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 4.6 小结 .....                    | (65)         |
| 4.7 案例分析: Long Valley 火山口 ..... | (66)         |
| 问题 .....                        | (69)         |
| 参考文献 .....                      | (69)         |
| 附录 压力和岩石裂缝 .....                | (70)         |
| <b>第5章 地热流体化学特征 .....</b>       | <b>(73)</b>  |
| 5.1 地热流体的地球化学问题 .....           | (74)         |
| 5.2 化学试剂——水 .....               | (74)         |
| 5.3 化学组分和化学系统 .....             | (75)         |
| 5.4 饱和度和质量作用定律 .....            | (77)         |
| 5.5 地热反应动力学 .....               | (83)         |
| 5.6 地热流体中的气体 .....              | (85)         |
| 5.7 自然体系中流体流动与混合 .....          | (88)         |
| 5.8 活性运移模拟 .....                | (90)         |
| 5.9 小结 .....                    | (92)         |
| 5.10 案例分析: 二氧化硅体系 .....         | (92)         |
| 问题 .....                        | (93)         |
| 参考文献 .....                      | (93)         |
| 附录 水分析 .....                    | (96)         |
| <b>第6章 地热系统的地质及地球化学特征 .....</b> | <b>(98)</b>  |
| 6.1 地热环境分类 .....                | (98)         |
| 6.2 区域地热系统分类 .....              | (99)         |
| 6.3 地热流体的成因: 资源勘查与评估的意义 .....   | (103)        |
| 6.4 地表显示 .....                  | (107)        |
| 6.5 流体地球化学勘探 .....              | (111)        |
| 6.6 流体包裹体 .....                 | (121)        |
| 6.7 蚀变和勘探 .....                 | (123)        |
| 6.8 小结 .....                    | (124)        |
| 问题 .....                        | (124)        |
| 参考文献 .....                      | (125)        |
| <b>第7章 地热系统地球物理勘探方法 .....</b>   | <b>(128)</b> |
| 7.1 航磁调查 .....                  | (128)        |
| 7.2 电阻率和大地电磁勘探 .....            | (129)        |
| 7.3 重力勘探 .....                  | (131)        |
| 7.4 地震和地震反演 .....               | (133)        |
| 7.5 温度测量 .....                  | (135)        |
| 7.6 遥感技术 .....                  | (135)        |
| 7.7 小结 .....                    | (137)        |
| 7.8 案例分析: 内华达州法伦 .....          | (137)        |
| 问题 .....                        | (139)        |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 参考文献 .....                     | (139) |
| <b>第8章 资源评估</b> .....          | (142) |
| 8.1 地热资源评估 .....               | (142) |
| 8.2 资源基础和储量 .....              | (143) |
| 8.3 确定资源储量 .....               | (144) |
| 8.4 储层容积 .....                 | (145) |
| 8.5 储层的热含量 .....               | (146) |
| 8.6 比热容的意义 .....               | (147) |
| 8.7 热提取效率 .....                | (149) |
| 8.8 小结 .....                   | (151) |
| 8.9 案例分析：美国地热资源 .....          | (151) |
| 问题 .....                       | (154) |
| 参考文献 .....                     | (155) |
| <b>第9章 钻井</b> .....            | (157) |
| 9.1 背景 .....                   | (157) |
| 9.2 地源热泵和直接利用钻井 .....          | (158) |
| 9.3 地热流体的开发 .....              | (161) |
| 9.4 小结 .....                   | (169) |
| 9.5 案例分析：日本 Kakkonda 地热场 ..... | (169) |
| 问题 .....                       | (171) |
| 参考文献 .....                     | (171) |
| <b>第10章 地热资源发电</b> .....       | (173) |
| 10.1 地热发电史 .....               | (173) |
| 10.2 灵活性和一致性 .....             | (175) |
| 10.3 地热发电设施 .....              | (175) |
| 10.4 干蒸汽资源 .....               | (176) |
| 10.5 热液系统 .....                | (181) |
| 10.6 二元发电设施：有机朗肯循环 .....       | (187) |
| 10.7 小结 .....                  | (189) |
| 10.8 案例分析：间歇泉 .....            | (190) |
| 问题 .....                       | (195) |
| 参考文献 .....                     | (196) |
| 附录 涡轮机 .....                   | (197) |
| <b>第11章 低温地热资源：地源热泵</b> .....  | (200) |
| 11.1 热泵基本原理 .....              | (200) |
| 11.2 热泵热力学 .....               | (202) |
| 11.3 性能系数与能效比 .....            | (203) |
| 11.4 近地表地热储层 .....             | (204) |
| 11.5 土壤的热导率与热容 .....           | (206) |
| 11.6 闭环系统的设计要素 .....           | (208) |

|                                               |              |
|-----------------------------------------------|--------------|
| 11.7 局部变化:测量的重要性 .....                        | (209)        |
| 11.8 小结 .....                                 | (210)        |
| 11.9 案例分析:Weaverville 热泵系统和美国地源热泵的成本效益分析..... | (211)        |
| 问题 .....                                      | (216)        |
| 参考文献 .....                                    | (217)        |
| <b>第12章 地热资源的直接利用 .....</b>                   | <b>(218)</b> |
| 12.1 评估可直接利用储层的量级 .....                       | (218)        |
| 12.2 热能传递的性质 .....                            | (221)        |
| 12.3 直接利用技术的可行性分析 .....                       | (227)        |
| 12.4 区域供热 .....                               | (227)        |
| 12.5 水产养殖 .....                               | (231)        |
| 12.6 干燥 .....                                 | (234)        |
| 12.7 小结 .....                                 | (234)        |
| 12.8 案例分析:坎比级联系统 .....                        | (235)        |
| 问题 .....                                      | (239)        |
| 参考文献 .....                                    | (239)        |
| <b>第13章 增强型地热系统 .....</b>                     | <b>(241)</b> |
| 13.1 增强型地热系统的概念 .....                         | (241)        |
| 13.2 增强型地热系统的强度 .....                         | (242)        |
| 13.3 增强型地热系统的特征 .....                         | (245)        |
| 13.4 增强型地热系统的发展历程 .....                       | (253)        |
| 13.5 热储工程 .....                               | (254)        |
| 13.6 地热储层的可持续发展 .....                         | (255)        |
| 13.7 小结 .....                                 | (257)        |
| 13.8 案例分析:Newberry 火山增强型地热系统 .....            | (257)        |
| 问题 .....                                      | (260)        |
| 参考文献 .....                                    | (261)        |
| <b>第14章 地热资源利用的经济因素 .....</b>                 | <b>(264)</b> |
| 14.1 地热发电的经济效益 .....                          | (264)        |
| 14.2 地热投资的经济效益 .....                          | (269)        |
| 14.3 地热项目开发 .....                             | (271)        |
| 14.4 可替代的经济模型 .....                           | (274)        |
| 14.5 小结 .....                                 | (276)        |
| 问题 .....                                      | (276)        |
| 参考文献 .....                                    | (277)        |
| <b>第15章 地热资源利用的环境影响 .....</b>                 | <b>(279)</b> |
| 15.1 排放 .....                                 | (279)        |
| 15.2 溶质浓度和资源回收 .....                          | (283)        |
| 15.3 地震活动 .....                               | (284)        |
| 15.4 地面沉降 .....                               | (291)        |

|               |                      |              |
|---------------|----------------------|--------------|
| 15.5          | 水资源的利用 .....         | (294)        |
| 15.6          | 土地资源的利用 .....        | (295)        |
| 15.7          | 小结 .....             | (296)        |
|               | 问题 .....             | (297)        |
|               | 参考文献 .....           | (297)        |
|               | 附录 地震测量 .....        | (301)        |
| <b>第 16 章</b> | <b>地热能源的未来 .....</b> | <b>(303)</b> |
| 16.1          | 地热能源市场发展历史 .....     | (303)        |
| 16.2          | 地压力资源 .....          | (304)        |
| 16.3          | 超临界地热流体 .....        | (308)        |
| 16.4          | 热电发电 .....           | (309)        |
| 16.5          | 灵活发电 .....           | (310)        |
| 16.6          | 混合型地热系统 .....        | (311)        |
| 16.7          | 小结 .....             | (312)        |
|               | 问题 .....             | (312)        |
|               | 参考文献 .....           | (312)        |

# 第 1 章 概 述

众所周知，地球的内部是非常热的，观测表明，随着距离地核越近，温度几乎以  $1^{\circ}\text{C}/100\text{ft}$  的速率上升。假如在距地表 12000ft 深的地方（相应地，温度升高  $120^{\circ}\text{C}$ ）开凿竖井放置锅炉，困难并非不能克服，我们当然可以利用这种方式获取地球内部的热量。事实上，没有必要到这么深的地方从储存的地热中获取能量，地球浅层的温度已足够高到蒸发一些极不稳定的物质，我们可以借此代替锅炉中的水。

——Tesla (1900)

上述证明，利用地球内部热量造福世界的愿景并不新鲜。即使对外行人也是显而易见的，能量以热的形式存在于地表之下——火山口喷发出灼热的熔岩，温泉冒出热水——证明地球的内部是热的。但是多年来，热源仍然是一个谜。为什么火山不均匀地分布在陆地上，为什么温泉在一些地方很丰富而在另外一些地方根本不存在，这似乎很令人费解。但是，在过去的 200 年间，地球科学家的深入研究解释了巨大的地热资源的来源、分布和特征。

现在很好理解的是，热量不断地从地球表面辐射到空间。部分能量是已经被土壤和岩石吸收并再次辐射（例如红外线）的太阳能。但是，地球科学家利用各种测量技术，已经能够确定辐射到空间的所有能量的 1% 是来自地球内部的热量。虽然这 1% 的辐射热量似乎微不足道，只代表了地球内部所含热量的很微小的一部分，事实上，这部分以热的形式存在于地球表面几千英尺下的能量超过全球能源需求的许多倍。

该热能就是地热能。它是 45 亿年前地球形成时的余热，也是天然放射性同位素衰变产生的热。地热能足够驱动板块构造运动，大陆和洋底缓慢移动形成地壳和上地幔。地热能也为大陆板块和大洋板块碰撞发生的造山运动提供能量。地热能足以熔化岩石，产生火山喷发，加热水形成温泉，以及为建筑物的地下室保温。地热能是一种永久的、可再生的、取之不尽用之不竭的能源。

20 世纪上半叶之前，地热能没有在与发电或其他应用有关的能源结构中发挥显著作用。之后，人们对能源生产和利用的环境、经济和社会问题越来越感兴趣，促进了对能减少依赖化石燃料的能源的勘探。本章将介绍这些变化的背景以及开发地热能的意義，本书其余部分将讨论详细的主题，总体而言，本书将为地热能的利用提供一个综合的知识架构。

## 1.1 全球能源概览

### 1.1.1 燃料的历史作用

人类的标志之一就是対能源创造性的利用。许多世纪以来，人类通过经验、洞察力和试验，发现火能够被控制并且用于我们的日常生活中；通过掌握这种能力和技能，人类的生活质量得到极大改善。

利用火来维持生活和工业依赖于燃料。人们普遍认为，以木材、草和动物的固体排泄物的形式存在的生物质能是人类最先系统利用的燃料。虽然这类燃料在地球的大多数地方很容易获取，但它们是相对低质的能源，即对于一定量燃料的燃烧，它们提供的能量很少。化石燃料（例如煤）的发现吸引了大家的注意力，因为单位质量的化石燃料提供的能量比大多数未经处理的生物质能多得多。此外，煤是块状的，易于运输，这使得大多数需要热量的地方选择使用这种燃料。后来发现的石油和天然气为高质能源的需求扩大了可选范围。特别是石油，因为其非常高的能量密度（单位质量燃料产生的能量）被广泛利用。图 1.1 展示了在美国这些燃料的使用随时间的变化。

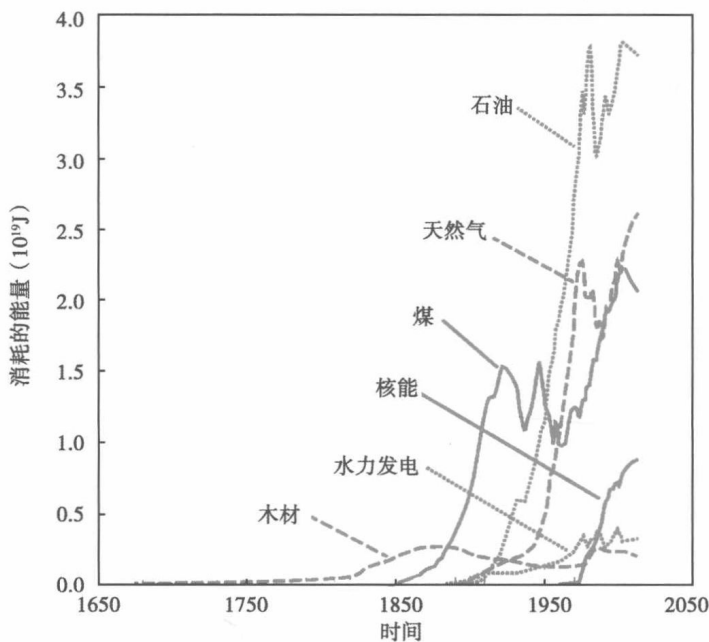


图 1.1 1650—2011 年美国的能源消费（据美国能源信息管理局）

获取、控制和保护燃料的能力已经成为支撑工业活动和经济增长的一个先决条件。因此，对能源的讨论已不可避免地与燃料的存在对能源生产的必要性联系在一起。当燃料是现成的，并且竞争燃料的人口数量相对较少时，增长和发展不受燃料来源的限制。但是，人口增长和科技的发展，已经改变了这种局面。

### 1.1.2 人口增长和人均能源使用的影响

图 1.2 所示的两个趋势展示了人口增长和能源需求带来的自然挑战。一个重要的事实是，地球上的人口一直呈指数增长。在 1850—2010 年间，人口从约 13 亿增加至 69 亿，同比增长超过 5 倍。目前的估计是，在 2000—2050 年间，人口将从约 61 亿增加至约 96 亿，在 50 年间增长 57%（联合国，2012）。尽管这一预测的增长速率比历史上的速率要慢，却能表明地球上人口的数量将继续快速增长。

图 1.2 (b) 展示了地球上每年人均能源使用的平均值。在 1850—2010 年间，每年人均能源消费的平均值从约  $4.85 \times 10^9\text{J}$  增加至超过  $77.3 \times 10^9\text{J}$ ，同比增长超过 15 倍。换句话说，不仅世界人口快速增长，每年人均能源使用也比以往更多。

在这种情况下，燃料的获取成为影响经济、政治和工业的重要因素。如果扰乱燃料的自



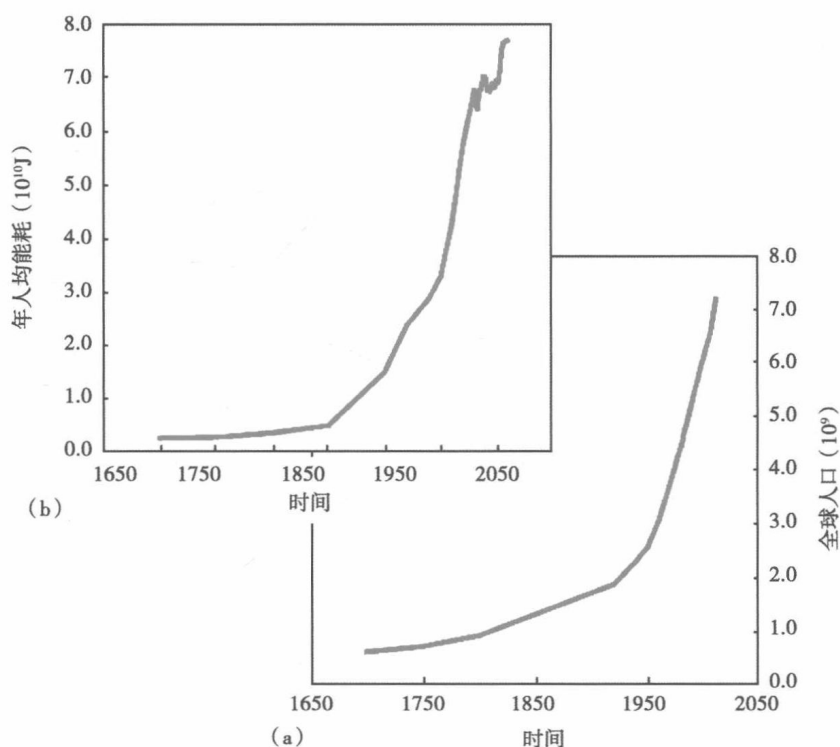


图 1.2 世界人口增长和人均能源消费趋势

(a) 自 1700 年以来世界人口的增长，1950—2006 年间的人口预测来自美国人口普查局的网站，2010 年的人口预测来自联合国 (2012)，早期的人口预测来自 Grubler (1998) 的数据；(b) 自 1700 年以来的人均能源消费，1700—1979 年间的能源消费是基于 Hafele 和 Sassan (1977) 的数据，1980—2006 年间的数据来自美国能源情报署和国际能源 2006 年年报，2010 年的数据来自国际能源机构 (2012)

由流通，会对全球产生重要影响。石油供应的动荡以及由此造成的石油市场的混乱，正如 20 世纪 70 年代初和 2007 年所发生的，强调了这一点。因此，用可持续且安全的方式寻找可靠的、价格合理的、能满足社会需求的能源非常重要。

### 1.1.3 燃料排放和环境问题

另外一个重要问题是关于燃料开采和能源使用对环境的影响。目前已有科学的证据说明使用碳基燃料发电已经影响到大气层和全球气候 (Solomon 等, 2007; Rohde 等, 2013)。碳基燃料的燃烧和人类活动产生的气体 (例如二氧化碳、氮氧化物和甲烷等)，所有这些都会影响大气吸收或传播辐射的能力。随着这些温室气体的丰度在大气中增加 (图 1.3)，大气对热能的透射率降低。大气成分的变化造成大气吸收热能的比例增加，其余的热能被辐射回太空中，导致地球平均地表温度的增加 (图 1.4)。正是这一过程使得金星的地表温度保持在基本恒定的 462°C 左右 (大约 736K 或 864°F)。温室气体的缺失也是火星的温度从来没有超过 0°C 的原因。

图 1.5 展示了自 1750 年以来历年全球二氧化碳的排放总量。1850—2011 年，人类燃烧化石燃料造成的大气中二氧化碳的年排放量从  $1.98 \times 10^{11}$  kg 增长到  $32.6 \times 10^{12}$  kg。这一变化表示增长幅度超过 163 倍。图中还显示出每年人均二氧化碳排放量的变化。同一时间段内，人均排放量增长了将近 30 倍。这清楚地表明，地球上人均每年排放到大气中的二氧化碳量

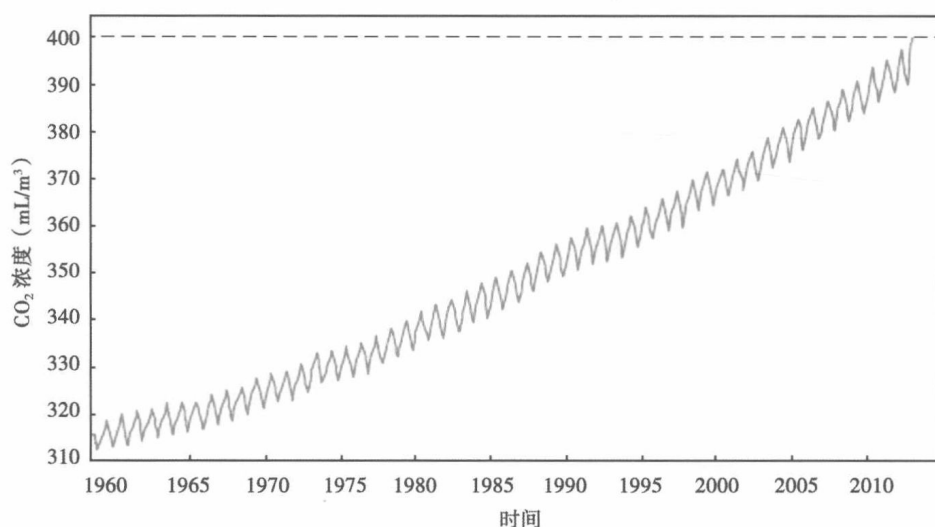


图 1.3 1958—2013 年 7 月 Mauna Loa 山大气中二氧化碳的浓度  
(据美国海洋和大气管理局网站)  
锯齿状曲线显示了二氧化碳浓度的季节性变化

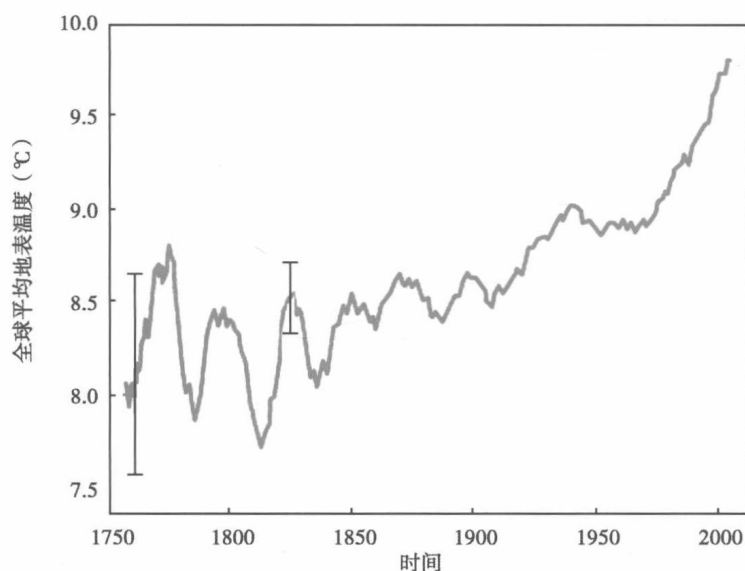


图 1.4 1753—2011 年全球平均地表温度变化 (据 Rohde 等, 2013, 有修改)

呈现越来越多的趋势。

无论是从经济、环境管理、社会稳定或是从国家利益的角度来看，能源消费和温室气体排放的模式已经受到全球的关注。正是因为这些原因，联合国环境计划署（UNEP）和世界气象组织（WMO）成立了政府间气候变化专门委员会（IPCC）。正如 IPCC 网站上所说，该机构“向世界提供关于气候变化的当前状态和潜在环境与社会—经济后果的科学观点”。正是在这一背景下，可再生能源（例如地热能）具有重要意义。

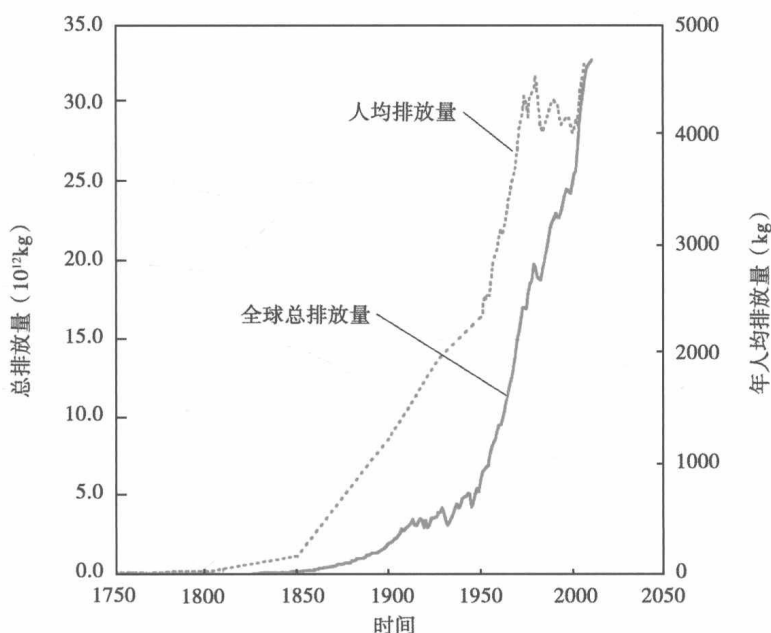


图 1.5 1750—2011 年全球每年二氧化碳总排放量和人均排放量（据 Boden, T. A. 等，二氧化碳信息分析中心，2010；美国能源信息署，2013）

## 1.2 可再生能源——地热能

### 1.2.1 无燃料、无排放和低挥发性

如“燃料的历史作用”部分中指出，历史上能源的使用一直是依靠燃料产生热量。传统上燃料来源于木材、煤、石油和天然气。在美国，这些燃料的使用和水力发电与核能发电的贡献一样随着时间发生变化（图 1.1）。煤、天然气和石油占美国能源使用的 85% 以上。虽然这些燃料加起来可以提供几十年至几百年的供给，但是温室气体的排放和基于石油的燃料的竞争（隐含在图 1.2 中）使之形成对能源有问题的依赖。此外，这些燃料来源于一个无法一直补充的资源库；相反，这些资源从需要数百万年才能形成的地质衍生物中被提取出来。作为一种商品，这些化石燃料是不可再生的，并会变得越来越困难，因此提取成本也越来越高。

不可再生资源的一个特点是面临资源枯竭，然而，如何判断枯竭有不少争论。这个问题将在第 8 章进行详细讨论，但与这个问题相关的几个方面将在下文进行讨论。这个问题的其中一方面涉及化石燃料能源的可获取性，比如石油、天然气和煤的获取。石油出现在地下储层中，一些储层为地表数百米之下多孔的岩石，石油可以相对容易地在其中流动。另外一些石油储存在更深处（地表之下数千米），岩石中孔隙之间几乎不连通，石油很难在其中流动。通过标准钻井技术可以很容易钻达浅部储层，石油可以轻易抽取出来，开采这类石油的成本相对较低。反过来，对于深部储层，钻井成本较高，产量较低。因此，如果客户只愿意为每桶油支付较低的价格，那么浅部储层会被开采，并被视为石油储备；而深部储层可能会被视为一种资源但不太可能被开采或视为石油储备，因为这么做的成本远高于潜在客户愿意