

能 源 与 环 境

——科技人员普及读物

[美] E.H. 桑戴克 著

田钟琦 巫益群 译
王炎庠 党志国

巫益群 校

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

这是一本供广大科技人员阅读的普及读物。本书重点介绍了自然能源和人为能源对地球环境和人类的影响。

本书可供从事能源研究和环境保护的科技人员以及高等院校理工科师生阅读。

Edward H. Thorndike
Energy and Environment,
A Primer for Scientists and Engineers
Addison-Wesley Publishing Company

能源与环境

—科技人员普及读物—

[美] E.H. 桑戴克 著

田钟琦 巫益群 译

王炎庠 党志国 译

巫益群 校

责任编辑 韩国光

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092¹/₁₆·印张13.5·字数 324千字

1985年4月北京第一版·1985年4月北京第一次印刷

印数1—3400·统一书号: 15175·598

定价: 2.80元

前 言

1970年4月22日世界“大地之友日”正式承认存在“环境危机”，而从1973年阿拉伯石油禁运开始，又正式出现了“能源危机”。在这些事件以后，社会舆论强烈要求，应使广大公众对环境问题和有关的能源问题有更好的了解，并受到教育。已有而且不断有相当数量的有关环境的书籍问世，其中关于能源的书籍为数甚少。这些书全部都是供一般外行的读者阅读。本书的对象并非那些一般的读者。

我对公众为了解能源和（或）环境而提出的启蒙要求决无非难之意。然而，我的目标是使专业的科学家和工程师在这些领域方面具备更渊博的知识。尽管公众日益频繁地要求科学家和工程师们对有关这方面问题给予咨询，然而他们中间只有为数甚少的人具有超越其专业范围以外的足够知识。环境和能源问题就其实质来说，有着最广泛的相互联系，一个对“宏观景象”的渊博知识至少和他们的任何一方面的具体知识一样具有同等的重要性。

因此，本书是为了供实际工作的科学家和工程师，尤其是供为上述专业培养的大学生们阅读的。目的在于使他们进入能源和环境的领域，并期望他们深入研究其最感兴趣的那些方面来丰富这一总的概念。

希望本书的大部分内容对于大学二年级的学生来说是能够领会的，同时对于研究生或实际工作的科学家来说也不会是过于平淡无味。为此目的，有些基础资料被收入在附录内。每章所附的问答题都有足够的难度，对每个人来说都会有所收益。为了有效地阅读本书，最起码要具有大学一年的物理和数学知识，以及大学一年的化学、生物学或地理学知识。从一种科学的观点来处理新资料的能力比具体题材的知识更为重要。

本书的基本用途是作为主修科学和工程专业学生的一本初级的、一学期完成的能源和环境课程的主要教材，尽管目前还很少有这样的课程（除了在少数学院外）。如果你们学院没有开设这样一门课程的话，那么你可以利用这本书作为热力学、核物理学、核工程学、能量转换过程等课程的补充教材。

以“能源与环境”为主题的这本书中所包含的题材，通常是分散在各种不同的传统学科：物理学、化学、生物学、地理学、气象学、工程学的各分支学科、经济学以及稍许涉及到的心理学和哲学。任何一个选修（或讲授）以本书为基础的课程的人，应有决心进入那些使他（或她）感到不便或缺乏准备的领域。鼓起勇气向前冲吧！这是为了造就教养有素的科学家和工程师应付出的代价！

本书是1973和1974年我在罗彻斯特大学任教时在讲课基础上逐渐形成的。听这门课的大学生们都可算是对我讲课进行科学试验的人，我的探讨受到他们的检验、修正和提炼，谨对他们为这种努力所做的贡献表示谢意。

在撰写本书时，我有幸在罗彻斯特或其他地方同许多人进行谈话和交往而深受教益。理查德·威尔逊（哈佛大学）向我友好地提供了他的书在出版前的草稿。乔治·霍克（罗彻斯特大学）和罗伯特·诺克斯（罗彻斯特大学）努力为我讲解光合作用，他们两人对第三章都提出了宝贵的批评意见。作者同詹姆斯·怀特（康奈尔大学）的交谈，对第三章所附食物链问题的展开很有帮助。艾伯特·西蒙（罗彻斯特大学）修正了我关于核聚变的一个错误观点（第五章）。乔治·伯格（罗彻斯特大学）对第六章向我提出了具体的批评性意见，并为我

重写了这一章的一部分。彼得·米勒曼（罗彻斯特大学）仔细阅读了前五章并改正了一些错误。罗伯特·科林（罗彻斯特大学）、劳伦斯·伦德格伦（罗彻斯特大学）、劳伦特·霍奇斯（衣阿华州立大学）、约瑟夫·安德雷德（犹他大学）和约瑟夫·普里斯特（迈阿密大学）审阅了全部底稿，并提出了许多有益的建议。虽然所有上面所提到的人都向我提供了宝贵的意见，但我并未完全按照这些意见去办。本书所包含的任何一个事实上的错误和所表达的基本原理的观点应完全由我负责。

底稿的打字和其他的技术准备工作全由伊丽莎白·鲍尔很好地加以完成了。她还帮我整理了文献目录。

能源和环境之间的重要联系，是由我的妻子伊丽莎白首先提醒我加以注意的，她提出，这是一个在环境舞台上物理学家发挥其才能最合适的领域。也是她首次提出这是一个很好的大学课程的题材。以后，她又提出这一课程的题材可能成为一本很好的书籍。她选录了大部分的引文作为每一章的卷首引言。她给予我的鼓励和促进（当需要时）贯穿于整个工作的始终。她通情达理地并欣然地承担了在撰写本书时必然会有相当大量的家务劳动和烦恼。自始至终，她在这项工作中的作用是必不可少的。我怀着深切的谢意，谨以此书献给她。

E. H. 桑戴克

纽约，罗彻斯特

1975年8月

目 录

前 言	i
第一章 绪论	1
第二章 全球的能流	6
2.0 引言	6
2.1 太阳	6
2.2 地球——我们最简单的模式	7
2.3 温度随纬度而异	9
2.4 太阳辐射的反射	10
2.5 大气——辐射效应	11
2.6 对流和蒸发	14
2.7 人类对地球能流的影响	14
第三章 生物能和生态系统	18
3.0 引言	18
3.1 光合作用——宏观的观点	18
3.2 光合作用——分子观	21
3.3 典型的光合效率	25
3.4 食物链	27
3.5 人类的食物链——农业	29
第四章 能源	34
4.0 引言	34
4.1 能源的质量因数	34
4.2 能源估价问题	35
4.3 连续性能源	36
4.4 贮存性能源	41
4.5 评价	48
第五章 能量应用技术	51
5.0 引言	51
5.1 矿物燃料火力发电站	52
5.2 核裂变能源	56
5.3 核聚变能源	62
5.4 太阳能方案	65
5.5 燃料电池	70
5.6 热泵	70
5.7 固态燃料转变为液态燃料	72
第六章 与能源有关的环境问题	78
第一部分 总的考虑	78
6.1 什么是“环境问题”?	78
6.2 费用-效益分析	81
6.3 解决的途径	83

6.4 体制与立法	85
第二部分 热污染	86
6.5 大范围的影响——气候	87
6.6 局部的影响——水	88
6.7 利用河流的单程冷却	89
6.8 利用湖泊的单程冷却	91
6.9 热污染消除计划	94
第三部分 放射性	95
6.10 电离辐射	96
6.11 电离辐射的生物效应	97
6.12 射线照射源和法定限度	98
6.13 来自核能的危险	100
6.14 来自反应堆的放射性释放	102
6.15 核燃料后处理、废物贮存和运输	106
6.16 增殖反应堆	108
6.17 核能危险性的概述	108
第四部分 空气污染	109
6.18 空气污染：概论	110
6.19 二氧化硫——一个区域性问题	114
6.20 二氧化碳——一个全球性问题	115
第五部分 与能源有关的其他环境问题	117
6.21 煤炭	117
6.22 石油	121
6.23 其他能源	124
6.24 电力	126
6.25 能量使用的审慎后果	129
第七章 能量的应用：历史和预测	140
7.1 能量的应用与时代的对照	140
7.2 能量的应用	143
7.3 经济上的一些考虑	147
7.4 对未来的预测	149
第八章 节约能源和降低增长率	155
8.0 引言	155
8.1 房屋取暖	155
8.2 运输	158
8.3 其他方面	163
8.4 观察与结论	164
第九章 结论与倾向性意见	169
9.0 引言	169
9.1 能源价格太便宜了！	169
9.2 能源增长最终必须停止	171
9.3 我们为什么需要更多的能源？	173

9.4 假如我们忽视了限度的话.....	176
9.5 能源零增长的后果.....	177
9.6 未来可能的方案.....	178
9.7 能源危机.....	180
附录A 热力学简介	183
附录B 核物理学简介	192
附录C 电磁辐射	198
附录D 1969年国家环境政策法第一篇	202
附录E 单位、换算系数、物理常数和常用数据	204
附录F 部分计算题答案	207

第一章 绪 论

我们只有认识自然,才能征服自然。

F.培根

能是做功的本领,做功可以是:对一物体施力 F ,使之位移一段距离 d ;使质量为 m 的物体,由静止加速达到一定速度 v ;使电荷 q 在具有电位差 V 的两点间移动;把质量为 m 的物体提升到高度 h 。上述各种情况都需要一定量的能(Fd , $1/2mv^2$, qV 或 mgh)。因为要使任何物质运动都需要能量,所以能量对于绝大多数自然学科和工程学来说,是一个核心概念,这一点并不奇怪。在各种各样的变化过程中,如化学反应、云的形成、细胞的活动、星体的演变、无线电波的传播、池塘中动植物的变化过程,能量均起着决定性的作用。同时,能量在人类的许多活动中也起着决定性作用,如运输、物品的生产、家庭供热等。因此,在经济学和社会科学各分支中,能量也是一个核心概念。尽管直到最近,这一点尚未被从事这些学科的学者们充分认识,然而情况正在迅速改变。

在这本书里,我们关注的是能量如何影响地球的环境,从而又如何影响到人类。我们讨论的内容要涉及到自然的能量过程(如气象和气候,生物系统)和人为的能量过程(如发电和配电)两个方面。自然的能量过程对自然环境产生重大影响,因此对人类也产生重大影响。人为的能量过程除产生所期望的结果(主要指有利于人类的结果)以外,也产生着不利于自然和人类环境,从而有害于人类的结果。此外,我们应该看到,人类活动也在越来越大规模地影响着自然的能流,这虽非存心如此,但至少是出于疏忽大意。

能量以许多不同的方式出现:热能(物质原子无规则的热运动的动能);机械能(宏观的物体有组织的运动的动能);电能(由于带电物体的相互作用力和电流相互作用力而产生的能量);化学能(化学键能,根据量子力学原理是由作用于原子能级上的电子力形成的);核能(由于核力和库仑斥力所形成的原子结合能);引力能(由于物体相互之间的万有引力而产生的能量,例如,水体因所处的海拔高度而拥有的势能);光能(可见光、紫外线和红外线等电磁辐射的能量)等。

能量可由一种形式转换为另一种形式。这种转换取决于热力学第一和第二定律(见附录A),它们是:

1. 能量是一个守恒量——尽管它能由一个地方传递到另一地方,从一种形式转变为另一种形式,但它既不会创生也不会消灭。也就是说,在转化前后能量不变。

2. 在能量转换过程中,能量具有从集中形式变为分散形式的趋势。它是以由它所能获得的功的数量的减少的方式来变化的。

现举例说明这两条定律,设想把一个很热的但比较小的物体同一个大湖的水接触。热会由热的物体流向湖水,使后者变暖了一点而前者却大为冷却,物体和湖水的温度很快均等,而略高于湖水原来的温度,总能量没有改变。在这个例子中,热能的总量确实未变。由此可见能量是守恒的,但是能量却大大地分散开来,大大地“稀释”了。按照最初的安排,可以

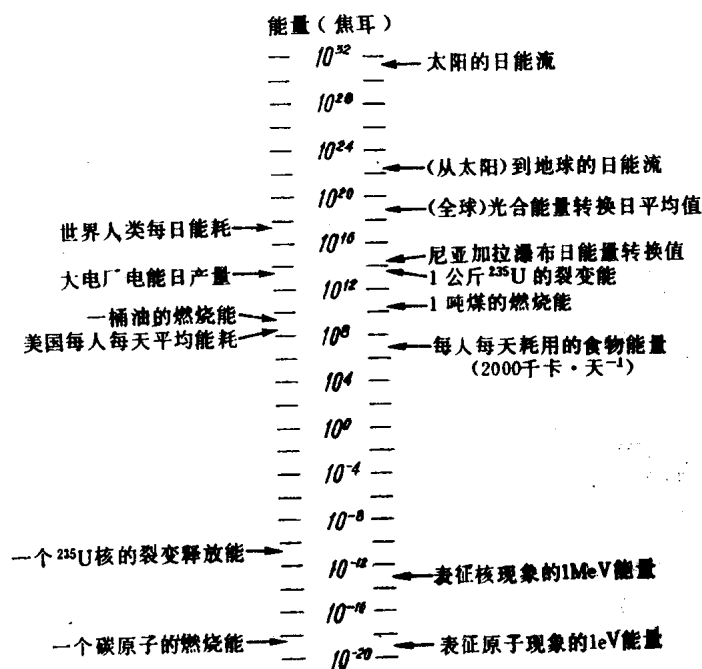


图1.1 用对数标度表示各种不同过程的能量

表1.1 各种不同过程的能量、能流和功率水平

过程	能量或能量/天	功率或能流 (瓦)
自太阳来的能流	3.2×10^{31} 焦耳/天	3.7×10^{26}
(太阳)到地球的能流	1.5×10^{22} 焦耳/天	1.7×10^{17}
(全球)光合能转换平均值	3.4×10^{16} 焦耳/天	4.0×10^{13}
全世界人类耗用能量	5.4×10^{17} 焦耳/天	6.0×10^{12}
美国人总耗用能量	1.8×10^{17} 焦耳/天	2.0×10^{12}
尼亚加拉瀑布能量换算值	2.7×10^{14} 焦耳/天	3.0×10^9
大电厂发电量	9.0×10^{13} 焦耳/天	10^9
一公斤铀-235的裂变能	8.0×10^{13} 焦耳	—
一桶油的燃烧能	6.0×10^9 焦耳	—
美国每人耗用能量	9.0×10^8 焦耳/天	10^4
世界每人耗用能量	2.0×10^8 焦耳/天	2.0×10^3
每人耗用食物能量(2000千卡/天)	9.0×10^6 焦耳/天	10^2
一个铀-235原子核裂变释放的能	3.0×10^{-11} 焦耳	—
一个碳原子的燃烧能	7.0×10^{-19} 焦耳	—

利用热的物体来产生蒸汽，从而驱动蒸汽机做功，但最终的状况是使湖水稍微变暖，简直不适用于获得有用的功。

由于我们的兴趣是能量的运动和转换，所以要讨论到功率、能流和能通量。功率用单位时间内的能量来表示，它是做功快慢程度的量度，或者更一般地说，它是能量从一种形式转换为另一种形式的速率。例如，电动机发出的功率就是电能转变为机械能的速率。功率是被转换的能量对时间的导数，而被转换的能量是功率的积分。能流的单位和功率的单位一样（单位时间的能），它是能量传递的速率（在一定的时间内通过某点的能量）。例如，单位时间内从太阳到达地球表面的能量是太阳到地球的能流。能通量是通过单位面积的能流。它是单位时间内穿过与能流方向垂直的单位面积上的能量。释放的能量就是能通量对全部时间和整个面积的积分。

能量发生转换和流动的规模从宇宙到亚原子，范围极广，大小不一。在我们所关心的能量对人类及其环境影响的范围内，我们要涉及这个范围里的多种规模——大到一个星体（太阳）的能量流动，小到化学反应中能量的释放。如表1.1和图1.1所示，其中能量和功率水平能达到很高的数量级。

广泛论述能量这一课题所碰到的一个最麻烦的问题是能量测量中的那一大堆迷惑人的单位。探讨宏观过程的物理学家用焦耳为单位测量能量，用瓦特（焦耳/秒）为单位测量功率。物理学家测量原子和亚原子过程的能量单位是电子伏。生物学家和化学家用卡或千卡作为能量单位。供暖工程师则使用英热单位（BTU）。电能以千瓦小时作为单位来出售。燃料单位常常被引用为能量单位，即桶油当量、吨煤当量等。功率的单位有瓦、卡/秒、英热单位/小时，还有马力。真是五花八门，令人困惑！

至于我，也帮不了读者的忙，不能够在写这本书的时候用一套单一的单位，只能按实际需要选取看来似乎是适当的单位而灵活地运用焦耳、千瓦小时、英热单位或若干桶油等等。我的理由是在没有普遍接受和统一使用的能量单位的情况下，阅读能量文献的人必须能够把一种单位转换成另外一种单位。现在也只好请读者接受这一点了。附录E载有大多数能量和功率标准单位的定义以及较通用的能量单位之间的换算系数。

在讨论有关人类使用的能量问题时，如同讨论其他许多人类活动问题一样，“增长”这一概念起着重要的作用。在这本书里，我们要涉及到人口、人类能量年使用量和使用能量所造成的各种不利影响的增长情况。增长方式可有不同。我们倾向于把增长看作是线性的，亦即在单位时间增加某一固定的量，例如普通的人从生下来到15岁每年约长高3英寸。但是许多过程却涉及按指数增长，其中单位时间增加的量是该段时间开始时所有数量的一定份额。放在银行里的存款赢得的复利就是按此方式增长的，不受食物供应、侵害或其他因素限制的物种群体也是按指数增长的。人们期望他们的薪水同样按此方式增长（增加头一年的百分之几）；经济学家期望国民经济生产总值也按这种方式增长。在本书中我们所关切的这些项目大致上是按指数增长的。

假定某一量 I 在单位时间的增加值为它本身的某个分数值 f ，那么在一小段时间 dt 内，增量 dI 可由下式求得：

$$dI = fI dt \quad (1.1)$$

得出微分方程：

$$\frac{dI}{dt} = fI \quad (1.2)$$

其解为

$$I(t) = I_0 e^{ft} = I_0 2^{t/T} \quad T = \frac{\ln 2}{f} \quad (1.3)$$

在上述任一（相等的）的函数中，时间总是以指数形式出现的，由此得名为按指数增长。 T 具有时间量纲，被称为倍增时间，因为在时间间隔从 $t = t_0$ 到 $t = t_0 + T$ 时， I 增加一倍。如果 f 是每年增加的份额，那么每年增加的百分比 p 是

$$p = 100f$$

则

$$T = \frac{100 \ln 2}{p} \approx \frac{70}{p} \text{ 年}$$

因此一个量若每年增长率为2%，则35年即可翻一番。

指数增长这个累加特征（从数学上看它是很明显的，但是从心理学角度看，我们对它却是没有想到的）表现为年增长量起初很小，但在几次倍增后就变得极大。这个问题将在1.5至1.7节中予以阐述。

问答题与计算题

1.1 如使用100焦耳能量，计算：

- (a) 把1千克水由静止态加速到速度 v ， v 为多大？
- (b) 把1千克水提升到高度 h ， h 为多高？
- (c) 把1千克水升高温度 ΔT ， ΔT 为多少？
- (d) 蒸发水，可蒸发掉的水量是多少？
- (e) 将水分解为 H_2 和 O_2 ，可分解的水量是多少？

（回答上述各题，需要查阅一些常数。）

1.2 美国单位时间平均耗用能量为 2.0×10^{12} 瓦，用焦耳、千瓦小时、英热单位、千卡和电子伏来表示美国平均年耗用能量。

1.3 一个不活动的成年人摄入能量（基础代谢）大约是2000千卡/天。采用瓦、马力、英热单位/小时来表示进入人体（食物），以及由此从人体散出（大体上为热）的平均的能流。

1.4 把一块3米²的屏幕放在离75瓦电灯8米处，并将屏面垂直于电灯和屏幕之间的直线。求落在屏幕上的能通量为若干？在屏幕上的能流为多少？一天照射在屏幕上的能量为若干？

1.5 一名能工巧匠把一块雕刻精美的棋盘献给他那富有的君王，巧匠要求的报酬只是棋盘的第一个方格放米重为1格令，第二方格放米2格令，第三方格放米4格令，第四方格放米8格令，第五方格放米16格令，以此类推。君王不熟悉指数增长的性质，一口答应。求

第一排 8 个方格需米多少格令？求前半盘棋盘（32 方格）需要多少吨米（1 克重为 50 格令，而 10^6 克为 1 吨）？求第 64 方格需米多少吨（世界年产米量大约为 3.0×10^8 吨）？

1.6 一个容量很大的养鱼池可养一百万尾虹鳟。如果虹鳟尾数超过上述数目，会因拥挤而供氧不足等原因造成大量死亡。只有在虹鳟尾数低于养鱼池养殖量的 80% 时，才不会出现养殖过多的迹象。开始在池内只养 2 只虹鳟，由于虹鳟繁殖力极高，其尾数每周翻一番。养鱼池主人密切注意，如发现尾数过多引起不利结果，就打算采取措施纠正。问尾数达养鱼池容量需几周？养鱼池主人得到预先警告的尾数是多少？

1.7 假设某一行星蕴藏 10^6 吨矿物资源（如煤）。该星球的居民每年以 1000 吨的速率耗用矿物资源。因此，按起始的耗用速率可供一百万年使用。又假设耗用速率每二十年翻一番，问资源可持续使用若干年？资源枯竭前 50 年，若按当时耗用率尚能供多少年使用？

有关阅读资料

Department of the Interior

United States Energy—A Summary Review. Washington, DC: Department of the Interior, January 1972.

下述资料具有一般性质，目的是作为了解全貌的参考书，并非专门供作第一章的参考。

EIC, Inc.

The Energy Index—A Selected Guide to Energy Literature Since 1970. New York: Environment Information Center, Inc., 1974.

本书备有与能量有关的参考书目，其中包括许多在 1970 年以前写的书，并且备有一份自 1970 年以来发表的论文索引，附有每篇论文的摘要。

Scientific American

Energy and power. A Scientific American Book. San Francisco: W. H. Freeman, 1971.

这是《科学的美国人》1971 年 9 月以书的形式出版的能源与动力专号。本期对能量作了广泛的讨论，但略去了“环境问题”方面的内容。

Richard Willson and William J. Jones

Energy, Ecology, and the Environment. New York: Academic Press, 1974.

（田钟琦译）

第二章 全球的能流

戏似乎一直要无限期地演下去,对演员争斗一类琐事毋须介意。我所担忧的只是太阳,
只要光照无恙,一切就会美满顺利。

R.弗罗斯特

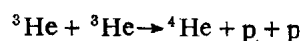
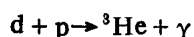
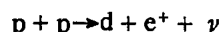
2.0 引言

地球的主要能源是太阳。太阳的辐射能发射到地球大气层。这种能量一部分被云、颗粒物质或气体分子反射或散射到外层空间;一部分被云、颗粒物质或气体分子所吸收,使大气层升温;还有一部分穿过大气层到达地球上的固体或液体表面,尔后被反射或被吸收。从地球表面反射的那部分能量移向外层空间时,同样须经过上述全部过程。被吸收的那部分能量使土壤或水升温(变成显热),或使水蒸发(变成潜热)。显热能由传导方式转移到低层大气,以对流方式(风和洋流)向水平方向和垂直方向传播,以红外辐射方式作垂直方向的辐射传播。红外辐射在通向外层空间的过程中要被吸收一部分。潜热游荡在大气之中,当水蒸气凝结时转变为显热。最终,进入地球周围的所有能量都要离去。既然能量是守恒的,而且在地球上积累下来的能量是微不足道的,那么到达的能量和离开的能量是保持平衡的(短期内会有偏差,但以一年内的平均值看,两者是很平衡的)。

如果前面说的内容给你的印象是个很复杂的情况,那么你就算得到了一个正确的概念。上述所有过程融合在一起决定着地球的温度、气候和天气。本章要用几个简化的模式来研究有关的几个自然过程。我们使用的模式中,即使是最复杂的,对照实际的世界仍相差一段很大的距离(仿真模式最近正打算使用高速计算机,而且需用现时最大的计算机)。我们使用模式要分别地说明一些过程,而且主要说明与辐射有关的那些过程。我们选择模式更侧重于它们的可解性,而不是它们的逼真性。对流是很重要的,但是研究它太难了,在此不做模式研究。

2.1 太阳

太阳上的能量流动和变化过程比地球上的更为复杂。在太阳内部深处以极高的温度(10^7K)发生着核反应(见附录B)。质子经一系列反应结合成氦:



这些反应是放热的(而不吸热),即最终产物比起始的反应物具有较少的潜能,这样,能量以动能和 γ 射线的形式释放出来(这个过程称为核聚变,在地球上目前是以氢弹方式来实现

的。许多研究计划正在探索一些方法，以便在地球上以非爆炸性的受控的方式来实现核聚变，这样从这个过程就能获得有用的能量，如以电能形式。该课题要在 5.3 节讨论）。太阳内部深处释放出的能量很快转变成热能，靠对流和辐射流向太阳表面。太阳表面的温度（~5800K）比内部的要低得多。太阳是完全不透明的，因此我们只能观察到温度较低的表面。由较热的内部辐射出的能量在到达表面之前又被吸收。从地球上我们所处的有利地位来看，可以把太阳当作一个简单的、温度接近 5800K 的黑体。

能量离开太阳表面以电磁辐射即红外辐射、可见光和紫外辐射的形式传播到地球。这种辐射的频率分布很接近温度为 5800K 黑体的频率分布。这就是说绝大部分辐射能居于可见的和接近紫外线和红外线的范围之内。5800K 黑体的频率分布（实际是波长分布）示于图 C.2（见附录 C）。

单位时间内达到地球单位面积上的太阳能的数量（能通量）可以用太阳常数 S 表示。设想在地球大气层顶上有一单位面积（如 1 米²）与地球同太阳中心的连线垂直相交，即它处的方位使太阳光直射其上。那么，在单位时间（如每秒）通过这一单位面积的能量就定为太阳常数。 S 的量度单位是能/面积·时间，或功率/面积。经测量它非常接近 1.36 千瓦/米² 或 0.136 瓦/厘米²。

2.2 地球——我们最简单的模式

在我们用的第一个流向和流出地球的能流模式中，我们把所有复杂的因素忽略不计。我们把“地球”看作一个没有大气和海洋的球体，而且还忽略其随纬度而产生的温度变化。我们在这个模式中假定“地球”是一个黑体，即它不反射入射辐射。

我们从要求的能量平衡出发，即在一段较长时间内流向地球的能量必须等于流出的能量。必须这样做，因为能量是守恒的，而地球（非常近于）即不积累也不消耗能量。流向地球的能量就是来自太阳的能量；流走的能量是由作为一个暖体的地球发出的红外辐射，它可以利用斯忒藩定律由地球的表面温度进行定量测定：

$$\text{吸收的能量} = S \times \text{截面积} \times a \times t = S\pi R^2 at \quad (2.1)$$

式中， a 是地球表面的吸收率，即被吸收的入射辐射部分。根据我们的假定（黑体）， $a = 1$ 。 R 是地球的半径， t 是涉及到的一段时间。

$$\text{再辐射的能量} = \sigma \epsilon T^4 \times \text{地球表面积} \times t = \sigma \epsilon T^4 \times 4\pi R^2 t \quad (2.2)$$

式中， σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数（ 0.567×10^{-11} 焦耳·厘米⁻²·度⁻⁴·秒⁻¹）， ϵ 是地球表面的辐射率。根据我们的假定（黑体）， $\epsilon = 1$ 。 T 是地表的温度，假定各处相同。

使吸收的和再辐射的能量相等，得

$$\pi R^2 Sat = 4\pi R^2 \sigma \epsilon T^4 t \quad (2.3)$$

和

$$T^4 = \left(\frac{S}{4\sigma}\right)\left(\frac{a}{\epsilon}\right) = \frac{0.136 \text{ 瓦} \cdot \text{厘米}^{-2}}{4 \times 0.567 \times 10^{-11} \text{ 瓦} \cdot \text{厘米}^{-2} \cdot \text{度}^{-4}} \quad (2.4)$$

因此

$$T = 278\text{K或}5^{\circ}\text{C}$$

(2.5)

注意此处引入了因子4。与阳光成垂直平面的地球面积是 πR^2 。它是一个吸收太阳射线的圆面积，是与吸收有关的面积（回想一下 S 的定义）。另一方面，地表的各个部分，包括背向太阳的一面都在进行再辐射。因此，地球的总表面积（ $4\pi R^2$ ）出现在再辐射能的表达式中。

在这个模式中我们的基本方程式是能量平衡方程式——流入的能量等于流出的能量。我们必须研究当这个系统稍稍失去平衡时会发生什么情况。它是要恢复原态呢，还是会失去控制？在研究这个问题之前，让我们考虑一个更为熟悉的情况，以确定我们要用的术语。

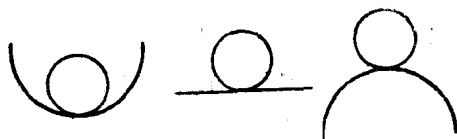


图2.1

我们考虑一下图2.1表示的三个石头弹子的情况。三个弹子都处于平衡状态，只要不加干扰，三个弹子均在原地停留不动。在凹面上的弹子处于稳定平衡状态。如果我们从其平衡位置上移动它一下，它会受到一个复位的力量，并经过几次振荡之后要回到原来的平衡位置。初始的位移是以后发生新位移的原因，这种情况谓之反馈。初始的位移使弹子受到一个与初始位移方向相反的力，引起了回到平衡地位的位移。这种具有自我对抗趋势的动作，被称为负反馈。我们注意到负反馈导致稳定平衡。

在凸面上的弹子，处于不稳定平衡状态。如果把它从平衡位置上移动一下，它会受到一个使它更加远离平衡状态的力，这就是正反馈。当然，弹子会滚离这个凸面。正反馈导致不稳定平衡。

在平面上的弹子是随遇平衡的例子。如果移动一下弹子，它既不会滚开也不会回到它初始的位置。这种情况说明没有反馈，是随遇平衡的必备条件。

现在结束这段离题的话，回到主题来考虑所用模式的稳定性。假设因某些原因，地球的表面温度降到平衡温度之下，根据斯忒藩定律，地球向外辐射能量的速率也会下降。到达地球的能通量并不取决于地球的温度，因此它不会下降，而且能量会在地球上逐渐积累，使它变暖。一系列的过程都与初始温度降相对抗，因此反馈是负的，这个系统处于稳定平衡。同样，如果温度在平衡温度之上波动，地球会辐射掉更多的能量，使其本身冷却，因此回复到平衡。

虽然这个模式因略去了所有复杂的因素而简化，但是它包括了首要而基本的一些过程（由太阳以可见光线流向地球的能量使地球加温，直至地球以红外辐射的方式反辐射能量，产生一个数量相等而离开地球的能流）。模式应产生数字结果，这种结果是真实数字的近似值，而且更为准确的模式必定是在这个模式基础上发展起来的，包含同样的一些基本特征。

由于假定地球的温度各处相同，我们得出的结果应为地球的平均温度。在地表观察到的地球平均温度是287K，即14℃。我们的答案（方程式2.5）太正确了。由于我们所做的假定是粗略的，就无法要求太准！接近观察值是偶然的，当我们精确地计算时就会看得很明显。

2.3 温度随纬度而异

众所周知，赤道附近的温度高于两极附近的温度。我们可以扩充上节使用的模式并尝试着计算这种效果。为简单起见，我们假定地球的旋转轴线与从太阳到地球的直线垂直。这样做，我们就甩掉了季节的变化，我们也大大简化了用公式表示这个问题所需要的三角学。

如图 2.2 所示，假定在地球上有一条处于纬度 θ ，宽度为 W 的细环带。它的周长为 $2\pi(R\cos\theta)$ ，面积为 $2\pi R\cos\theta W$ 。这是与再辐射有关的面积。如果在那个纬度上每日的平均温度是 $T(\theta)$ ，那么这条带单位时间会辐射 $\sigma T(\theta)^4 2\pi R W \cos\theta$ 的能量（这条带所辐射的功率）。

这条带投射到与日光垂直的平面上的面积是 $(2R\cos\theta) \times (W\cos\theta)$ 。该面积与吸收有关，因此这条带单位时间吸收的能量为 $2RW\cos^2\theta S$ （这条带所吸收的功率）。

人们很想使这两个式子相等，而且我们就要这样做。但是我们要确定一下在这样做的时候所做的假定。我们假定不存在这种作用过程：把能量从相应的一个 θ 值移至另一个 θ 值，即趋向或远离赤道。这是一项比我们在 2.2 节的模式中所作的假定要强得多得多的假定。在那里我们假定除了把能量带到整个地球表面而又带走的吸收和再辐射以外没有别的作用过程。在这里我们假定除了把能量带到部分地球表面而又带走的吸收和再辐射以外没有别的作用过程。我们将要看到这是一项很不好的假定。

使吸收的功率等于再辐射的功率，即

$$2RW\cos^2\theta S = 2\pi RW\cos\theta\sigma T(\theta)^4 \quad (2.6)$$

$$T(\theta)^4 = \left(\frac{S}{\sigma}\right)\left(\frac{\cos\theta}{\pi}\right) \quad (2.7)$$

$$T(\theta) = 296 (\cos\theta)^{1/4} \text{ K} \quad (2.8)$$

由式 (2.8) 计算出的几个不同纬度的温度值列于表 2.1。赤道至两极的温度变化太大了，致使这个计算失败。这主要是由我们假定中的缺陷引起的。风和海洋两者由对流而产生的气流和水流把相当大量的能量从赤道传送到极地。如果不把能量的对流传送包括在能量平衡方程式之中，我们就别想在温度对纬度的依赖关系上取得合理的结果。

表 2.1

$\theta(\text{度})$	$T(\theta)$
0 (赤道)	296K, 23℃
30	286K, 13℃
60	247K, -26℃
84	164K, -109℃
90(极点)	0K, -273℃

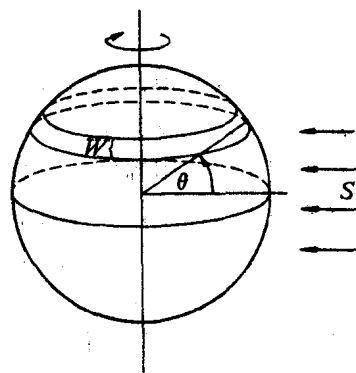


图 2.2

2.4 太阳辐射的反射

前两节中的模式假定地球是个黑体，即它吸收落在它上面的全部阳光。然而日常经验告诉我们这并不是事实，某些物体（如云、雪地）反射一大部分照射在它们上面的光线。地球人造卫星照片（图2.3）很清楚地说明了这个问题。表2.2列举了几种物体表面的反射率。很显然，我们必须改进我们的模式，把太阳辐射能的反射考虑进去。

对我们的模式来说，我们需要的是按整个地球表面适当平均的反射率。我们特别需要知道投射在地球上的太阳辐射被反射的百分率。这一百分率谓之反照率，以 A 表示。它曾由绕地球大气层上空轨道运行的人造卫星测定过，其值接近30%，即投射在地球上的太阳辐射有30%被反射了，其余的70%被吸收了。

云是构成反照率的主要因素，担负25%。其余的5%主要来自地球表面，还有大气中的分子和颗粒。因为地球表面平均一半由云覆盖，这些云的平均反射率必须接近50%，才能构成25%的反照率。这同表2.2中的数据是一致的。

现在我们可以把地球不当成黑体来考虑。把地球的平均温度视作2.2节中所说的温度。我们看到

$$T^4 = \left(\frac{S}{4\sigma} \right) \left(\frac{a}{\epsilon} \right) \quad (2.4)$$



图2.3 同步气象卫星-1在1974年4月28日拍摄的卫星照片
图中所示为云和安第斯山脉雪地的高反射率[照片由美国全国航空和宇宙航行局(NASA)提供]

表2.2 各种物体表面的反射率

物 体	反射率 (%)
云 { 薄卷云	20
{ 高层云	50
{ 高积云	
{ 积 云	70
不冰封的水	3—8
不冰封的水，极地	25 (按掠射角)
雪和冰	30—70 (干净新鲜的雪为最高)
可耕地或针叶林	10—15
落叶 林	18
沙漠	30

资料来源: SMIC, *Inadvertent Climate Modification*, Report of the Study of Man's Impact on Climate. Cambridge, Mass: MIT Press, 1971.