

第 I 部分

能 量

第 1 章 能量的流动和提供

第 2 章 化石燃料

第 3 章 核能

第 4 章 可再生能源

第 5 章 能量的利用

总结

习题

推荐读物

第 1 章 能量的流动和提供

实际上,能量的使用问题是所有环境问题的基础。对于工业文明的多种需要来说,能量的利用驱动了经济的发展,而且获得足够的能量已经成为提高全人类生活水平的关键。同时,人类在能量使用上的浪费也更为明显:石油的漏损,因开采造成的土地破坏,大气和水污染,以及二氧化碳和其他温室气体的增多造成的全球变暖等。这种廉价能源的过度使用与其经济价值越来越不协调。在本书的第 I 部分,我们将探究能量产生和能量消耗的背景以及在保护环境的前提下社会满足能量需求的前景。

1.1 能源及可持续性

对环境的讨论常常围绕着可持续性这个引起争议的问题。这是由于人类的活动消耗自然资源的速度超过了自然界恢复它们的速度。可持续性意味着为子孙后代维持这些资源。

这个概念有许多方面的应用,例如,可持续性伐木,是指在允许树林再生的基础上获取木材。可持续农业在不耗竭土壤的营养容量或自然居住地的生物多样性的前提下给人类提供食物。越来越多的团体采用超出法律约束的手段保护环境的可持续性,例如自愿地约束那些对环境有改变的物质的排放或者禁止使用硬木大量制造家具。工业生态的新领域(参见 5.6 节)为工业界提供了减少物质消耗的方法以维持其可持续性。

然而,怎样实现可持续性有广泛的争论。可持续性砍伐树木是意味着不砍伐野生林木而只从林场中砍伐树木呢,还是选择性地砍伐野生林木以维持其健康呢?可持续农业是意味着使用有机肥而不使用化学肥料呢,还是无论使用哪种,只要最理想地保证土壤具有最高效力和最高的收获呢?

采矿业就是可持续性观点的不明确性的好的例证。似乎从地球上开采矿物是最不具有可持续性的行为。迄今,尽管经过上百年的开采,金属仍然还被利用着,其原因就是冶

炼工艺的不断改进,使人们能从低品质的矿石中提取金属并增加金属的循环使用。金属市场是可持续的,尽管高品质的矿石已经用尽且不能再生。

当然,采矿造成的影响不同于资源耗竭。采矿破坏了地表并污染当地环境,虽然这些影响能够通过调节降低到最小。开采和处理使金属分散到全球,增加了人们对有毒元素,如汞、铅(参见 17.5 节)等对健康威胁的关心。开采这些金属是否最终是可持续性的问题是不清楚的。另一方面,没有人因为开采普通工业金属如铁、铝而担心威胁健康,因为它们具有较低的毒性且在地壳中有丰富的含量。为了节约能源(参见 5.5 节)和减少污染,鼓励对金属的循环使用而绝非停止对它们的使用。

可持续性中最引人注目的当数能量的使用问题。燃尽地球上储存的石油、天然气和煤显然是不具可持续性的行为。这些能源是不可再生的(参见第 5 章,热力学第二定律)。那么耗尽化石燃料是否有本质上的危害呢? 毕竟它们为我们提供了便宜充足的能量和许多有用的日常用品(例如塑料)。限制化石燃料使用的更重要的原因是,这些燃料产生的最终产物 CO_2 增强了温室效应。但是,这些影响还是可以通过陆地和海洋吸收 CO_2 而消除(参见 2.7 节)。

任何情况下以化石燃料作为能源最终都是不可持续的,但最终是多长时间? 10 年还是 100 年,这要依燃料的使用政策来决定。为了代替这些化石燃料,我们必须选择可替代能源:核能(如果它能安全发展,参见 3.5 节)、热核能(如果它在技术上是切实可行的)或可再生能源(大规模利用是困难的,而且成本很高,参见第 4 章)。目前有人希望尽快结束对化石燃料的依赖,而把希望寄托在可再生能源的使用上,但是如何更好地使用已知的能量并保护环境还是不很清楚的。

总之,可持续性的概念是比指导行动更具重要性的问题,这个答案,包括道德和政策的抉择,是建立在对如何改造物质世界清楚了解的基础之上。事情并非看上去那么简单。

1.2 自然界的能量流动

考察人类对地球表面上持续不断的巨大能量流动的利用是有益的。这个流动示于图 1.1; 这些能量以每年 10^{20} kJ 为单位流动(图 1.1 的下部标明了能量单位和它的转换)。在我们计算的能量中只有很少一部分来自非太阳能:潮汐能(0.0013×10^{20} kJ),它产生于月亮和太阳之间的引力;地热(0.01×10^{20} kJ),它是由于地核熔化产生的(人工产生的核能也是非太阳能,但是它和整个能流相比是微乎其微的)。地球上其他的能量,都是来自太阳,无论是直接还是间接的。

太阳每年发出的能量大得几乎无法想象—— 1.17×10^{31} kJ,但只有很少一部分,每年

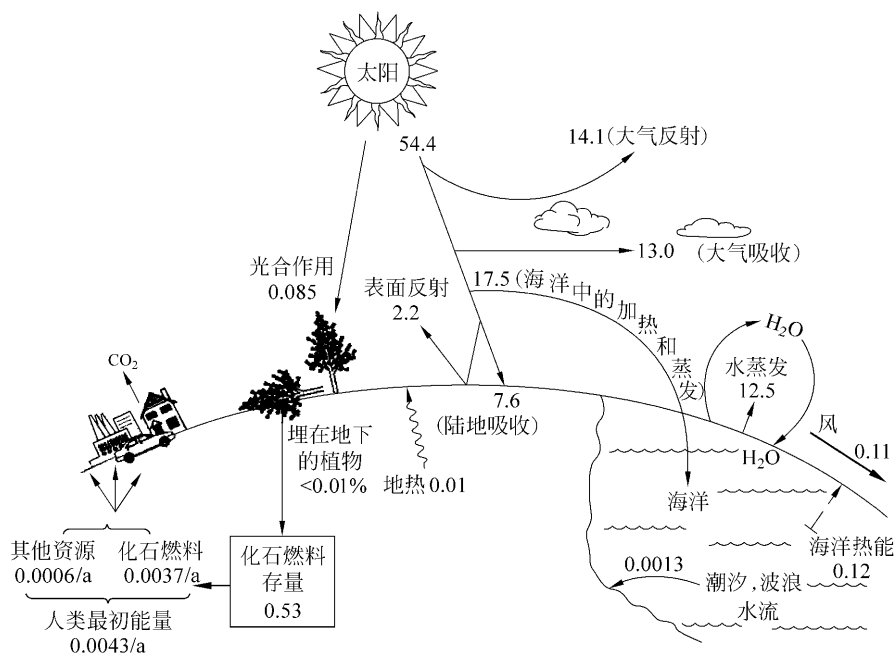


图 1.1 地球上每年的能量流动(能量单位: 10^{20} kJ)

54.4×10^{20} kJ, 被地球截取。太阳到地球的距离有 1.5 亿 km (9300 万 mile)。大约 30% 的能量被大气 (26%) 或星体表面 (4%) 反射或散射到太空了。该百分比称为反照率, 它对地球上所有能量的平衡起了至关重要的作用。

其余的光能被地球大气 (占 24%)、地表 (占 14%) 和海洋 (占 32%) 吸收, 并且在它被再反射到太空之前转变成热。这个能流通过风、雨、雪驱动了地球的气象系统。到达地球表面的被吸收的大量能量有一半进入了水循环, 水的大量蒸发和降水为我们提供了淡水。把 1g 水加热 1°C , 需要 4.2J (1cal) 的能量, 同样蒸发 1g 的水则需要更多的能量, 液体蒸发需要的能量叫做蒸发潜热。在 15°C , 也就是全球平均气温下, 水的平均蒸发潜热是 2.46kJ/g, 在水蒸气凝结成降雨的时候就会释放出来, 这就是为什么降雨的时候总伴随着风暴, 而且即使是中等程度的降雨也会放出大量能量的原因。

我们通过筑坝和水力发电从水循环中得到很少一部分能量, 这些能量间接地来自太阳能流。

被地球表面 (陆地和海洋) 吸收的太阳光大约 0.34% 用于绿色植物和藻类进行光合作用。我们正是依靠部分太阳能流获取食物并在地球上得以生存。我们使用的能量有些是通过燃烧木材或其他生物材料 (垃圾、牛粪) 等获取的。其余的能量大部分是通过那些光合作用的生产者被埋藏在地下几亿年, 形成化石燃料, 被我们开采后获得的。

基础知识 1.1 单位和转换

当我们考虑环境问题的时候,最重要的问题就是“多少”的问题。无论是有毒物质的排放还是污染物的释放,或者是能量利用的数量,多或少构成了是否成为问题的关键。数字通常不需要很精确,有时已知的一些事物用数字 10 的方次(称为数量级)表示就足够了,因为总数常常大到 10 的许多次方。

a. 指数

为了避免写数字的时候要写许多 0,我们习惯用指数形式来表示,写成 $n \times 10^y$,这里 y 是指数,相当于 n 乘以 10 的次数。如果指数中数字前面有负号,那么 y 就相当于 n 乘以 10^{-1} 即 0.1 的次数。举例来说: 5.1×10^3 表示 5100,而 5.1×10^{-3} 表示 0.0051。

另外,为了避免数字太大,还可以在单位前面加上前缀,千(k),兆(M),吉(G),太(T),拍(P),艾(E),也就是 y 分别为 3,6,9,12,15 和 18;厘(c),毫(m),微(μ),纳(n),皮(p)和飞(f),也就是一 y 分别为 2,3,6,9,12 和 15。括弧中的字母是前缀的缩写符号。这样 $5.1 \times 10^3 \text{ m}$ (缩写)可以写成 5.1km, $5.1 \times 10^{-3} \text{ m}$ 可写作 0.51cm 或 5.1mm。

b. 公制单位

为了测量某物的量,我们必须指明测量单位。长度单位用米(m)和千米(km);面积用公顷(hm^2), $1 \text{ hm}^2 = 1 \text{ 万 m}^2$;容积用升(L), $1 \text{ L} = 1000 \text{ cm}^3$;质量单位用克(g)、千克(kg)、吨(t), 1 t 等于 1000kg。这也是国际上通用的单位。美国常使用英制:长度单位用英寸(in)、英尺(ft)、英里(mile);面积单位用英亩(acre), $1 \text{ acre} = 43\,560 \text{ ft}^2$;体积单位用品脱(pt)、夸脱(qt)、加仑(gal),质量的单位用磅(lb)和吨(t),吨有时也叫短吨, $1 \text{ 短吨} = 2000 \text{ lb}$ 。本书将使用公制单位,但下列单位变换有时也是有用的。

$$1 \text{ in} = 2.540 \text{ cm}$$

$$1 \text{ ft} = 0.305 \text{ m}$$

$$1 \text{ mile} = 1.609 \text{ km}$$

$$1 \text{ acre} = 0.405 \text{ hm}^2$$

$$1 \text{ qt} = 0.946 \text{ L}$$

$$1 \text{ gal} = 3.785 \text{ L}$$

$$1 \text{ lb} = 0.454 \text{ kg}$$

$$1 \text{ 短吨} = 0.9072 \text{ t}$$

温度在公制系统中用的是摄氏度($^{\circ}\text{C}$),而在英制中用的是华氏度($^{\circ}\text{F}$)。在海平面,水的沸点是 100°C ,即 212°F ;冰点是 0°C , 32°F 。所以:

$$(^{\circ}\text{F}) = (^{\circ}\text{C}) \times 9/5 + 32^{\circ}$$

在科学计算的时候,我们需要用到热力学温度(T),它用绝对温标(K)来表示,绝对零

度是 -273°C ，所以

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}$$

时间的单位各地都用秒(s)、分(min)、[小]时(h)、天(d)和年(a)来表示。

c. 能量单位

能量有许多形式，在历史上也有许多计量单位。我们选择作为标准的单位是焦(J)，最初是作为功的单位定义的。1J等于质量为1kg的物体在 1m/s^2 的加速度下移动1m的距离所做的功^①。1kJ=1000J, 1EJ=10¹⁸J。

所有形式的能量都可以用J作单位，但许多地方还常常用历史上的热能单位卡路里(cal)，因为它更直观一些。1cal相当于1g水温度升高1 $^{\circ}\text{C}$ (从14.5~15.5 $^{\circ}\text{C}$)所需要的热能。两个单位之间的换算关系是

$$1\text{cal} = 4.184\text{J}$$

一般情况下，卡路里常常用作食物中所含能量的单位。可惜的是，营养学家使用的卡路里(第一个字母大写)和我们的所说的卡路里不一样，它是我们的卡路里的1000倍(实际是千卡)，所以如果你每天摄入2000Cal的热量，实际上等于 2×10^6 cal。

美国人常用的一个能量单位是英制热单位(BTU)，它定义为1lb水升高1 $^{\circ}\text{F}$ 所需的热量。1quad(Q)等于10¹⁵BTU, J和BTU之间的换算关系是：

$$1\text{BTU} = 1055\text{J} = 1.055\text{kJ}$$

$$1\text{quad} = 1.055\text{EJ}(10^{18}\text{J})$$

功率单位也是与能量单位有关的，功率是能量释放的速率，标准的单位是瓦(W)，1W=1J/s。

反过来，能量等于力乘以能量释放所用的时间。这样电功率计量单位一般用千瓦时(kW·h)来表示。

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 1000\text{J/s} \times 3600\text{s/h} = 3.6 \times 10^6\text{J}$$

光波的能量正比于它的频率，它通常用波数来表示($\nu = 1/\lambda$)，单位为 cm^{-1} 。举例来说，蓝光的波长是500nm，它的波数或能量就是 $(500 \times 10^{-7}\text{cm})^{-1} = 20\,000\text{cm}^{-1}$ 。波数能与每摩尔光子的热能或化学能相当，这样：

$$1\text{kJ/mol} = 1463.6\text{cm}^{-1}$$

电子伏特(eV)一般是物理学家用来描述放射线或基本粒子的能量单位。它相当于任何携带单位电荷的带电粒子通过1V的电位差时所获得的能量。

$$1\text{eV} = 8064.9\text{cm}^{-1}$$

通常使用的是该单位的100万倍单位即兆电子伏特(MeV)，1MeV=10⁶eV。

① 原文有误，原意为：1J等于质量为1g的物体在 1cm/s^2 的加速度下移动1m的距离所做的功。

例题 1.1 下雨的能量

问题：已知在常温下蒸发 1mL 水所需的能量是 2.46kJ，那么在 $10\times 10\text{km}^2$ 的面积上产生 2cm 的降水所释放的能量是多少呢？如果 1t TNT 炸药在爆炸的时候释放的能量是 $4.18\times 10^6\text{ kJ}$ ，下雨所释放的能量相当于多少吨 TNT 呢？

解答：在基本原理 1.1 的最后我们给出了千瓦时与焦的换算，有许多问题本质上都是能量单位转换的问题。我们知道冷凝 1mL 水会释放 2.46kJ 的热量，所以我们能够应用降水时大量水的换算。容积等于底面积乘以深度， $1\text{mL}=1\text{cm}^3$ ，并且 $1\text{km}=10^3\text{ m}=10^5\text{ cm}$ 。

$$\text{雨水的体积}=2\text{cm}\times (10\times 10^5)\text{cm}\times (10\times 10^5)\text{cm}=2\times 10^{12}\text{ mL}$$

$$\text{下雨产生的能量}=2\times 10^{12}\text{ mL}\times 2.46\text{kJ/mL}=4.92\times 10^{12}\text{ kJ}$$

1t TNT 炸药可以释放 $4.18\times 10^6\text{ kJ}$ 的能量，我们可以通过除以这个因数换算出降雨产生的能量相当于多少吨 TNT。

$$\text{TNT 当量}=4.92\times 10^{12}\text{ kJ}/4.18\text{kJ/t TNT}=1.18\times 10^6\text{ t TNT}.$$

这就向我们提供了在暴风雨时所能产生的能量参考。最大的暴雨释放的能量大约相当于 100t TNT 产生的能量。

1.3 人类的能量消耗

与太阳释放的巨大能量相比，人类所利用的能量是微乎其微的（见表 1.1）。2000 年人类消耗的总能量为 $4.3\times 10^{17}\text{ kJ}$ ，仅相当于被地球表面吸收的太阳能量的 0.017%。图 1.2 显示，在 1960 年到 2000 年，世界的能量消耗增加了 3 倍多，而且还在迅速增长。

表 1.1 全球能量的流量

能 源	速率/ 10^{20} kJ/a
太阳辐射到太空的能量	1.17×10^{11}
辐射到地球上的太阳能	54.4
影响地球气候和生物的太阳能	38.1
造成地面水分蒸发的能量	12.5
风能	0.109
产生光合作用的太阳能	0.0850
在净初级生产中吸收的能量	0.0430
从地球内部传导到地球表面的能量	0.0100
人类 2000 年消耗的原始总能量	0.004 30
2000 年燃烧化石燃料消耗的能量	0.003 69
潮汐和波浪产生的能量	0.001 30
美国 2000 年消耗的总能量	0.001 04
人类通过食物消耗的能量	0.000 260

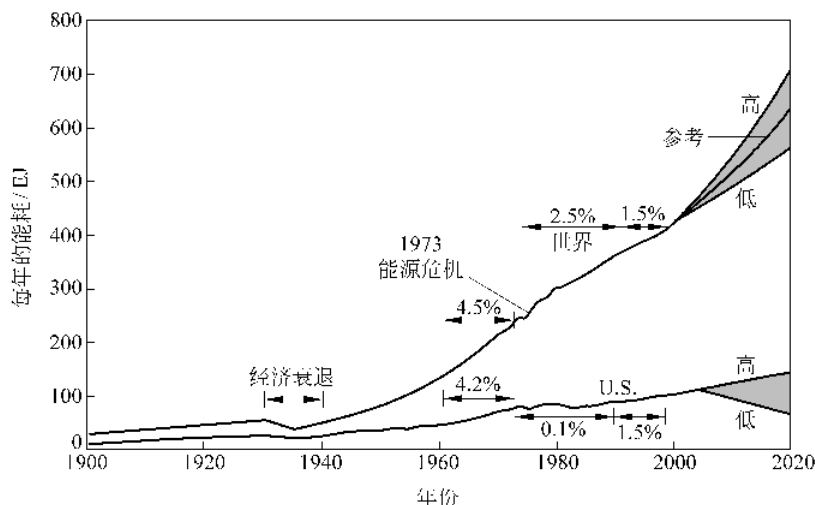


图 1.2 1900—2020 美国和世界能量消耗的趋势和预测

来源: World data taken from Energy Information Agency, U. S. Department of Energy, *International Energy Outlook 2001—World Energy Consumption*, Washington, DC. U. S. “high” trend taken from same source. U. S. “low” trend assumes U. S. complies with reduction in carbon emissions by 7 percent relative to year 1990 in the period 2008—2012, as prescribed by the Kyoto Protocol on Climate Change.

1960 年到 1973 年,美国和全世界能量消耗总量每年分别增长 4.2% 和 4.5%。为了适应 1973 年和 1979 年的能源危机,1974 年到 1986 年能源的消耗速率增长非常缓慢,尤其是美国,能量消耗的速率曲线几乎是平直的。尽管如此,这期间美国的经济增长仍达到了 40%,每年减少能量开支 1500 亿美元。这个节约是因为建筑业、汽车业和工业技术能效大幅提高的结果。

自从 1987 年以后,美国的能源消耗的增长速率达到了 1.5%,同样世界在这期间的增长率也在下降(下降 2.5%)。这和美国在 1973—1986 年的增长率几乎为 0 相关,其中包括国际市场原油的低价位因素。2000 年,占世界人口 5% 的美国人使用的能量占世界使用能量总数的 25%。

还有 3 条曲线没有在图 1.2 中标出: ① 部分发达国家能源使用的增长率降低了 1.5% 或者更多。西欧平均年增长率只有 0.9%。② 东欧的下降趋势更为明显,前苏联在分裂以后,能源消耗从 1989 年的 79.0 EJ 下降到 1998 年的 51.9 EJ。③ 发展中国家能源消耗的增长速率在南美和中美、非洲和东亚分别是每年 3.6%, 2.6% 和 4.4%。这些数据有些列在表 1.2 中。

全球能量消耗的发展趋势很大程度上受到中国和印度的影响,如果它们现在的增长

率分别为每年 3.5%和 6.3%,那么中国到 2030 年,印度到 2033 年每年的能源消耗就会达到 100EJ(相当于美国现在的能源使用量)。

表 1.2 10 个人口最多国家的能量利用趋势

国 家	人口/100 万 (2000 年)	能量使用/EJ (1998 年)	增长速率/% (1987—1998 年)	翻一番所需 时间/a
中国	1277.6	36.0	+3.5	19.8
印度	1013.7	13.3	+6.3	11.0
美国	278.4	100.5	+1.5	46.2
印尼	212.1	3.8	+7.3	9.5
巴西	170.1	8.6	+3.8	18.2
巴基斯坦	156.5	1.8	+5.2	13.3
俄罗斯	146.9	27.5	−4.6	—
孟加拉国	129.2	0.4	+5.9	11.7
日本	126.7	22.6	+2.6	26.7
尼日利亚	111.5	1.0	+3.5	19.8
总数 (1998)	3622.7	215.5	+1.3	53.3

国 家	人口/100 万 (2020 年)	能量使用/EJ (2020 年)	增长速率/% (1998—2020 年)	翻一番所需 时间/a
总数 (2020)	4333.8	380.9 ^{①②}	+2.6	26.7

① 假定对于个别国家,1998—2020 年的增长率和 1987—1998 年一样。
② 假定俄罗斯的能量消耗在 1998—2020 年始终固定在 27.5EJ。
来源: Energy Information Agency, U. S. Department of Energy(1999). International tables for population and energy consumption trends, Washington, DC. (<http://www.eia.doe.gov/emeu/international/contents.html>)

今后 20 年的增长趋势也标在图 1.2 的曲线(阴影部分)中。这条延伸的曲线来自美国能源部能量信息处(EIA)和气候变化政府间小组(IPCC)的预测。他们提供了关于经济增长、石油的未来价格、能源节约技术的执行、每头牲畜的经济价值的地域差异和化石燃料的使用程度。较高的曲线是当前趋势的延续,较低的曲线部分是根据《京都气候变化议定书》号召(参见 6.5 节),符合 EIA 设定的 2020 年二氧化碳的排放量比 1990 年减少 7%。

指数增长是不能无限制地持续增长的,一年增长 4%,18 年就增长 1 倍,再过 18 年又增长 1 倍,自然界没有任何事物可以不受约束地成倍增长。最后增长趋于水平(见图 1.3 自然增长曲线)。能量使用的迅速增长的一段描述了一个到能量消费的新水平的转变。这里有许多问题,那就是这个速率是什么,并且能否达到的问题。将来的发展有许多不确定性,正像图 1.2 中两条分离的射线一样。