

第 1 章

引言

自然已经枯竭了 我们必须改变这种现状。在过去的十年中，这种观点的正确性已经在小科学团体中引起了辩论，但没能达成共识。最近，有关这个问题的讨论已经超越了这些小团体而转移到了政治领域。随着辩论范围的扩大，辩论的双方变得更少了些理性思维而更多了些感情冲动 相对立的双方有时和颜悦色 但经常是怒气冲冲地各说各的理。情绪激动的场面可能比理智的见解给人的印象更深刻，但是为了认识自然的结构、使自然走向枯竭的各种作用，以及对人类和地球上的生物所造成的后果，无论感情和理智都需要确凿的证据和对自然的清楚的了解。在过去的很多个世纪里，人类一直假定大自然是无限的，是一种免费的公共物品。如果这个假定是错的，那么理智告诉我们的后果将会非常严重，我们之中的大多数人将要失去生命 而感情告诉我们 我们还有可能失去美丽，连同生命本身某些本质的东西。这个辩论如此之重要，却又悬而未决。为讨论这个问题，我们需要解释这个怀疑论者可能觉得它会枯竭，而未来创建论者可能觉得它要被取而代之的大自然。

自然已经枯竭的观点首先是“自然”的概

念，但对自然科学的认识至今仍是非常之局限的。所有的现代科学，无论是物理还是生物，都是一种对自然的调查研究；而所有科学杂志中最著名的也是简单地称做《自然》。我们研究的魄力掩盖着我们的许多愚昧无知，因为通常发现具体的现象比揭示一般性真理要容易得多。假如给一个教授提供资金让他去研究基因的点状突变，或者支持一个学生去分析某种熔岩流的成分，肯定是可以得到结果的。但是如果我们试问为什么大气包含约 $1/5$ 的氧而不是 $1/6$ 或 $1/3$ 时 我们将会发现 没有一本教科书 也几乎没有几篇科学论文会给我们提供这个题目的答案。只有那些勇敢的初出茅庐的年轻人或在科学上旁敲侧击的长者，敢于去解决这样一类不那么迫切需要解决的问题。因此，我们对控制自然环境的系统还没有一个清楚的认识，而这个系统就是我们大多数人称之为“自然”的世界。我们对天气比较了解 还分析了大气层 统计了树种，并把鸟儿分了类。但是，我们还不完全知道控制大气成分、地球温度或物种分布的更深刻一层的过程。

由于我们对自然的了解是那么贫乏，因此我们难以证明自然枯竭的观点。这一点在关于地球的辩论中经常被提起：对于那些我们对其还一无所知的事物我们不能确认它的死亡，甚至即使它已经灭绝，我们也不会向它的匆匆而过而致哀。人类社会同自然界分离开来，东京或纽约的董事们不会把他们自己同某个远方的幽灵的命运联系起来，而这个幽灵可能或不可能被他们的行为所摧毁。对于这一点，理智的答案是这个远方的幽灵也许还控制着曼哈顿的大气；而感情的和更委婉的回答是泰坦巨人族的乐队仍在继续演奏。

如果自然已经枯竭 那么这种枯竭已突然到来了。今天 当我造访剑桥大学 在写这些文字的时候 大学生们正在绿茵场上例行他们的午间游戏——投滚木球，就像他们已经玩了几个世纪的那种古老的滚木球一样。所有的一切看上去是连续的 没有中断 或者说甚至没有什么变化。今天的天气在 2 月里显得格外温暖，春

天里的鲜花正在绽放。楼顶上的彩旗在劲风中飘扬。最近刚刚有过很多次暴风雨，或许这种温暖和能量是天气随机变化的部分，而并非永久变化的证据。彩旗飞扬是为了庆祝女王伊丽莎白二世就职的纪念日，一种没有变化的连续的象征。她于 1952 年就职，那时自然似乎没有引起什么质疑。在不到 40 年之后的今天，我们辩论着自然的枯竭。正如英帝国在为时不长的年代里消失了一样，自然的原始帝国也可能消失。自然界的成分依然存在——我们仍然在呼吸空气，雨还在从天上降落——但是决定环境的力量可能已经远离了自然之手。春天的花朵可能不再因自然的呼唤而绽放。

俗话说，自然不会是真空。如果自然之源已经枯竭，那么人类便成了地球面貌的主宰。近年来，一种持续的科学辩论，尤其是由美国地理联合会组织的科学辩论，已经考虑到了对自然的规划问题，不过要有使环境的自然管理得以优化的控制规则的存在为前提。如果没有这样的规则，那么所有的事件就都是偶然事件，旧的自然的灭亡就简单地成为一件异常严重的事故，即一件消除了多样性却没有什么东西严重地影响人类本身的故事，尽管它可能使我们的灵魂感到悲哀。然而，如果有一种规则控制着环境的平衡，我们就需要快点去揭示它，这样我们就可以在我们的遇难者死亡后去管理这个系统。也可能自然还没有死亡，它有着我们未知的规则和校正机制以对抗和消除某些不稳定的因素。

而人类则与自然完全不同，有很多团体，并且人口也在快速增长。如果假设这样一种分散的力量可以取代自然的职能，那就未免太乐观了。然而，如果设想人类无所作为，那就又太悲观了。

接下来，我们就要详尽地研究这些主题——自然、自然的枯竭以及自然的更替。在第 2 章阐述自然界，尤其是大气的作用，并概述了一些我们所知道的或推测得到的地球的管理问题。为了揭示其是否能够证明自然之灭亡的观点，在第 3 章我们讨论了引起环境变化的各种作用，并在第 4 章估价了变化引起的直接后果。第

5~7章检查了开场白中的第二部分：如果自然已经灭亡，它将怎样被取代，以及人类怎样管理自己？本书的最后，从更深刻的意义上讲述了这个问题，即我们应该如何在一个已经变化且仍在继续变化的世界上生活？

第 2 章

自然界的地球

稳定态不是一般的状态，从来没有过完全稳定的自然环境。在整个地质时代，环境一直在变化着，有时比较和缓，有时比较剧烈。生物也在不断地适应着那些变化；同时许多变化本身就是由生物引起的。

人类，现代智人，约在 10 万年前一经进化而成，就立即开始改变自然界。结果似乎是一些动植物——猛犸象和乳齿象、巴勒斯坦古王国和希腊的狮子以及美洲栗树——灭绝的突变。公元 1950 年以前，地球上的动植物群以及全球环境尽管还没变到引起气候显著改变的程度，但也一直都在变化着。

自然界地球的历史

大气层控制着地球表面的温度，在整个地质时代都是这样。许多有关太阳和太阳系演化的模式表明，太阳在年轻时放射的能量比现在弱得多，几十亿年前才变亮。如果这些模式是正确的，那么早期的地球没有冻结的原因就是大气中的气体起着保暖的作用，使地球表面温度升高了 50°C 。甚至在现在，在明亮的太阳照耀之下，地球的有效温度，即一个假想的没有气

体的星球以地球相同的发射辐射率发射辐射时的温度)远在冰点之下。这种温度下的行星是不能养育生物的。所幸的是大气中的水汽(H_2O)连同二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)以及其他微量气体共同起作用,使全球的平均温度升至 15 左右,这使生物非常舒适。这些气体遮盖着地球从而使地球表面保持温暖。

差不多在 40 亿年前,年轻的太阳的亮度大概只有现在太阳的四分之三。不仅如此,地质证据表明,大气层可能包含比现在多得多的二氧化碳,由于大气层的保暖作用,海洋是液态的。科学家对早期大气层的状态并没有多少确切的了解,一种假设是早期的大气主要是二氧化碳、氮气(N_2)以及水汽。虽然大气中微量气体的含量是由活的有机体的排放来维持的,但是在过去的 40 亿年中,不论是甲烷还是氨(NH_3)从来都不是大气中的主要成分。可能是在 42 亿~38 亿年前,地球上开始有了生物。生物最古老的地质记录可以追溯到 35 亿年前,在那个年代以前就有各种各样的复杂细菌群存在的证据。生物已经开始运用大部分重要的生物化学反应,例如光合作用中所包含的光化学反应,地质证据表明生物已经开始对大气层进行加工,也管理着氧气、二氧化碳和氮气。

在地球的大部分历史时期,生物是单细胞生物和细菌。细菌利用所有有效资源繁殖,因此生物变得丰富起来,只是没有留下什么化石资料。约 10 亿年前,多细胞有机体产生了。约 5.7 亿年前,在寒武纪初期,具有坚硬组织(如壳)的第一种动物出现了。在以后的 1 亿年里,海洋中长满了复杂的、充满竞争的生物链。继而陆地也开始出现生物,最早的是简单的植物、昆虫、蜗牛等。大约在 2 亿年前,在二叠纪和三叠纪之前,陆地上开始形成了一种复杂的、由多种动植物组成的生态网,同时多种多样的复杂的生物群落占据着海洋。许多二叠纪和三叠纪时期的较大的陆生动物是有哺乳动物特征的爬行动物,包括我们自己的祖先。在二叠纪到三叠纪时期的大多数时间里,陆地上主要是这些有哺乳动物特征的爬

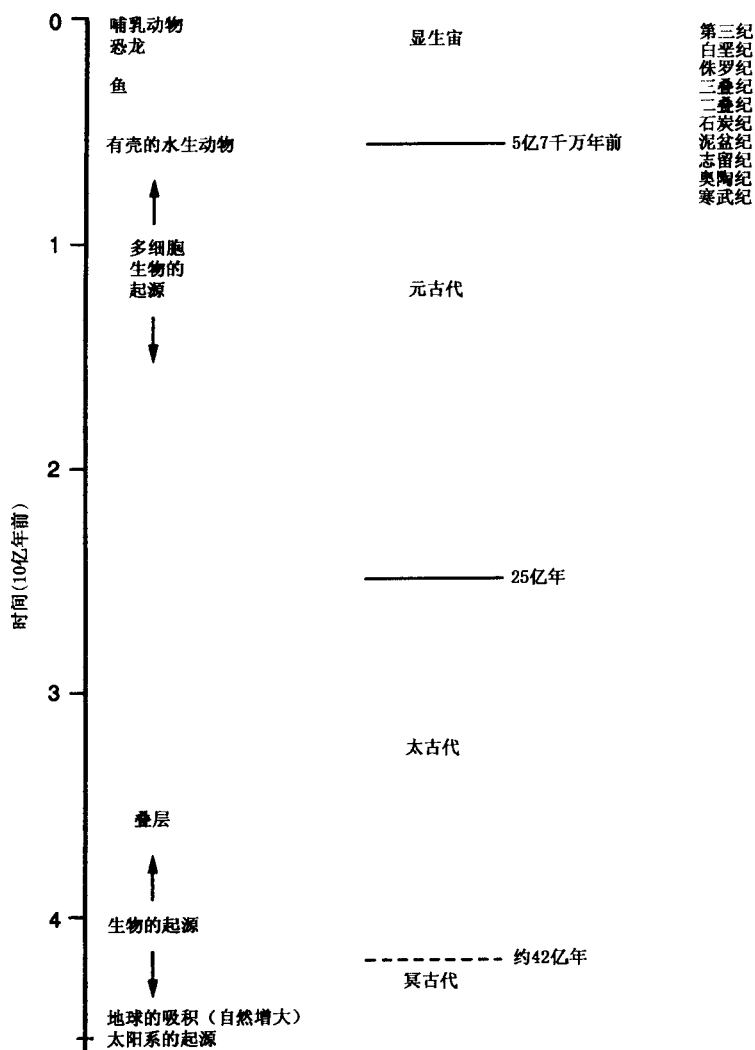


图 2.1 地质年代以及生物史上的主要事件

20 世纪中大量的物种从生物圈中消失。物种的损失程度可以与

地质记录中仅由最大规模的消亡事件（例如白 垩纪晚期的大灾难）所造成的损失相匹敌。

环境的物理控制因子

能量

差不多大气所接收的所有的能量都来自太阳。要证明这一点很简单：当你躺在海滩上的时候，身体被太阳照到的一面比较暖和。有些能量的确来自地球内部，但除非是火山爆发把尘埃和气体带进空气从而改变了大气对太阳辐射的接收的情况，除此之外，这种作用很小，通常情况下对气候并不重要。

太阳是灼热的，因而从太阳获得的能量表现为光能（这是热星体的特征），富含短波辐射，尤其富含我们用肉眼就能看到的彩虹颜色的波段。地球向太空发射的能量与它从太阳接收的能量数量相当，以平衡入射的能量。如果不是这样，那么地球的温度就会不断上升。因为地球比太阳的温度低得多，所以地球射出的能量大多是长波，在红外波段。我们不能看到这种能量，但可以从热能感觉到它。

地球表面的温度完全取决于入射和射出的能量平衡的结果。在自然的地球上，一些入射的太阳辐射直接被送还给太空——有被大气散射掉的，有被云反射掉的，也有被地表直接反射掉的。入射的太阳辐射光的较大部分被大气中的水汽、尘埃和气体（例如臭氧）以及云、地表所吸收。这些被吸收的能量 尤其是被地表吸收的能量控制着地球的表面温度。一些从地表射出的热能以红外辐射或热辐射的形式直接射回太空。一些热能从地表射出后被大气中的水汽（在云中的水汽或直接就是水汽）和二氧化碳所吸收。剩余的热能离开了地表，一部分被携带变为可感热能（例如在热的空气里）但是大部分是被水汽携带。以烧开水做例子 我们增加能

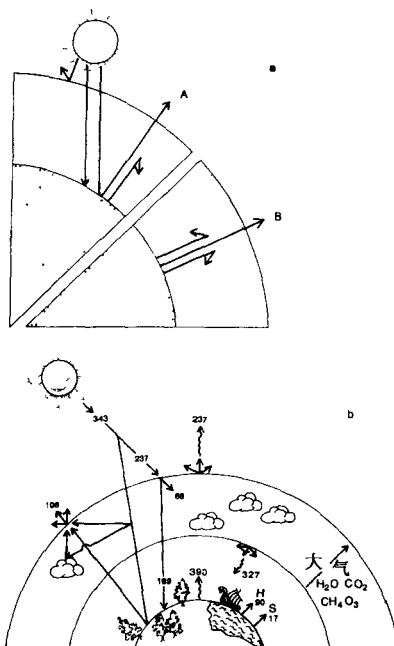


图 2.2 地球和大气的能量吸放

图中详细地说明了温室效应的复杂性。a 图为温室过程的概述。温室气体吸收离开地球的热辐射将其再发射回地表，其作用像一床毯子。（这个过程远比这个描述复杂 参看 b 图。图中过程 A 表示日光照射到地球上，它透过大气层时，在不同高度被吸收或被反射。它又以长波辐射被发射回太空。这种再发射的能量有一些被大气中的温室气体吸收 如果温室气体的浓度增大 如过程 B 所示，在低层大气将有更多的再发射能量被吸收，在能量最终被再发射回太空之前使那里的温度升高。 b 图为全球能量平衡。从一年的平均情况看，大气顶层每平方米接收到的太阳辐射为 343 瓦。打个比方 想像相当于 3.5 个 100 瓦的电灯发出的光全部照在 1米^2 的面积上。太阳辐射有 106 瓦/ 米^2 （或者每平方米一个 100 瓦的电灯 被反射 这就是站在月球上的宇航员之所以感到地球是一个发光星体的原因。剩余的 $237\text{瓦}/\text{米}^2$ 以长波辐射或热辐射的形式发射回太空，因此地球是辐射平衡的。能量在被下传到地面和被上传至太空的过程中，被以各种方式加工处理。大气层吸收了 $68\text{瓦}/\text{米}^2$ 。地面吸收了 $169\text{瓦}/\text{米}^2$ 连同大气层发射到地面的能量 $327\text{瓦}/\text{米}^2$ 。地面又向上发射 $390\text{瓦}/\text{米}^2$ 的热能。地面还释放 $90\text{瓦}/\text{米}^2$ 的潜热 (H) 和 17 的显热 (S)。

量时，水被加热，然后汽化变为水蒸气。液态水变为水汽要消耗大量的能量，然后这个能量就被水汽携带，称做潜热。在地球表面，液态水被汽化，水汽就被带到空气里。当这个过程进行时，热能就从地表面变化为空气中的水汽潜热。我们能够感觉到太阳的热能或一块热石头的热能，这就是它称为潜能的原因。潜热传输对于控制大部分地表的温度是非常之重要的。整个地球都在进行热能传输到水汽的过程，尤以热带海洋上为甚。热带雨林也蒸发出大量的水汽。要是用生理学的概念来解释，就是说好像地球上的热带地区在发汗。就像一个人在热天里要保持凉快就得出汗一样，热带雨林也在析出水。J. E. 罗维洛克用术语‘地生理学’来描述这个过程。我们调节体温的方式（如出汗或者穿衣服、盖毯子）和地球控制温度的方式非常相似。

温室效应

地球大气中的一些气体因其吸收辐射的特殊方式而在地球的能量平衡中起着极其重要的作用。臭氧（ O_3 ）是紫外线短波的一种很强的吸收体。二氧化碳则吸收较长的波段，尤其是红外线。水有一个复杂的吸收谱，吸收各种波长的光。当然，水也可以形成云。光进入大气层后，能量被大气有选择地吸收。同样，地面发射回太空的能量通过大气时也被大气中的各种吸收体有选择地调卫。

到达大气层顶的阳光被大气层中各种气体和过程相继过滤。第一个主要的过滤器是高层大气（平流层）中氧和臭氧的吸收，它们除去了高能量的短波紫外线。这种高能量的光对大多数有机体都是有害的，因此臭氧过滤器可以保护生活在其下方的生物。当光往下射至低层大气时，它被空气分子和大气中其他化学物质散射。这种散射过程赋予我们一个蔚蓝的天空。在低层大气，空气中的水汽和其他成分也吸收光，这一方面加热了大气，一方面减少了最终到达地面的光强。

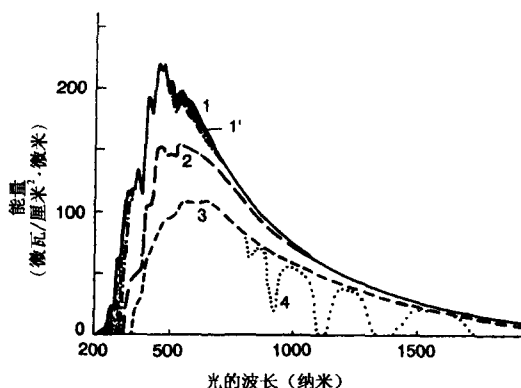


图 2.3 通过地球大气的太阳辐射

水平轴是太阳光的波长,以纳米 nm 为单位 从紫外线 (左边界) 到七色的可见光区,一直到红外波段 (右边界),垂直轴是对应波长的能量通量 以微瓦 / (厘米²·微米) 为单位。曲线 1 是到达大气外边界的辐射。曲线 1' 表示在通过了平流层臭氧的保护层之后还有多少辐射能。阴影区,尤其是在紫外线的 200~300 纳米波段的阴影区,表明了被这个保护层吸收了多少辐射。剩余的辐射经过其余的大气层 被空气分子 (曲线 2) 和尘埃粒子 (曲线 3) 进一步吸收和散射。曲线 4 表示最终到达地球表面的光,大多数在 400~1000 纳米波段。这个区域包括可见光谱,这是生物赖以生存和能够适应的波段。

为了保持平衡,地球必须向太空发射辐射。展开上述观点,就是有多少辐射进来,就得有多少辐射出去。地面和大气中各层的温度都取决于达到什么样的辐射平衡。一个灼热的辐射体,例如太阳,发射出许多短波辐射,例如紫外线。短波的光能量很高。而一个冷的辐射体 例如地球 则进行长波辐射 在红外波段 所含的能量也是较少的。红外线 (我们通过热来感觉到它) 离开地面和大气又发射回太空。如果因某种原因使得返回太空的辐射被阻挡,那么能量就被捕获。系统就会变暖直到最终恢复平衡。

离开地表和大气又反射回太空的光被几种气体,尤其是二氧化碳、甲烷和水汽有选择地吸收。这种吸收使低层大气和对流层变暖,最终是向上发射辐射。尽管这种吸收过程非常复杂,且随其

他因子（如云和尘埃）而改变很多，但一般来说，这种吸收气体的浓度越高，低层大气的温度就越高。

这些气体的辐射特性的结果就是我们通常所说的温室效应。在一个典型的由玻璃制成的公园温室中，阳光（短波波段的光）是能够入射进来的，因为普通的可见光和短波的光是可以透过玻璃的。而已经进来的热能却不能够以辐射的形式再离开，因为玻璃对地面释放的长波红外辐射是不透明的。结果，温室内部变暖。大气层也是这个道理。大气通常比地面（很高层次的大气除外）温度要低一些。这就意味着地面或海洋射出的任何热能能在向上穿越大气层时总要受到某种程度的捕获。热能或红外能量的捕获主要由水汽和云，同时也由二氧化碳、甲烷，以及其他微量气体完成。例如，大部分的阳光是可透过二氧化碳的，它们可以穿过二氧化碳到达地面或低云上，但是射向太空的红外辐射就受到二氧化碳的阻挡，二氧化碳吸收这些辐射，温度变高，并使它下面的和周围的大气变暖（图 2.4 和 2.5）。

如果没有大气层或不存在温室效应，那么地球的温度大约为 -18°C 。而事实上，其平均温度约为 15°C 。二者之差是由大气的温室效应产生的，它使地球增温约 33°C 。如果不是这样，那么海洋将是冰冻的，而生物则有可能灭绝。温室效应如果太小，那么地球将有可能毫无生机；而温室效应如果太大，地面热量则会增加，使生物难以忍受。

从图 2.4 可以清楚地看到，诸如甲烷和二氧化碳这些气体浓度的增加会从整体上改变大气的行为，并使富含这些气体的低层大气和对流层变暖。而另一方面，自然界的臭氧又起着相反的作用，因为人们发现大多数臭氧存在于高纬度地区的平流层大气中。因此自然界的臭氧在大气中的净作用是通过过滤太阳的短波辐射使平流层大气变暖，而使对流层大气变冷。目前，微量气体包含所有这些气体，而它们的任何改变，尤其是影响到可见光谱附近的重要光波时，都将改变大气的辐射行为。在对流层中温室吸收成分

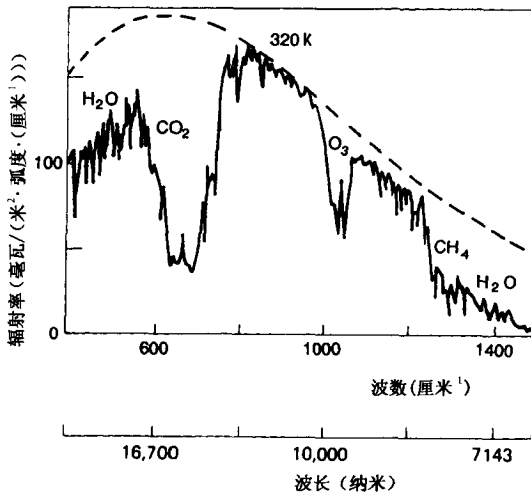


图 2.4 地球释放的热能，并与 320 开 (K) 相当于 47℃) 的黑体所释放的能量作对比

在这次撒哈拉沙漠上空的卫星测量中，横坐标是波数（每厘米的光波的数目），其下给出了对应的长波或红外区域的波长。注意这个坐标与图 2.3 和 2.5 相比是反向的。垂直轴是由卫星测出的实际发射向太空的一种能量指数。虚线 320 开) 大致表示由撒哈拉的热地表所射出的能量。两条曲线的差就是大气层的温室吸收。注意 H_2O 、 CO_2 、 O_3 和 CH_4 的重要性在于阻挡向外的辐射而大气窗区是波数在 $800 \sim 1000 \text{ 厘米}^{-1}$ 的区域。

的增加意味着为保持一种能量平衡，地球表面和低层大气的温度必须升高。大气中的其他主要气体（没有在图 2.5 中给出虽然可能对大气顶层很重要，但对低空温度范围的辐射却无关紧要。当考虑到对气候的影响时， CH_4 、 N_2O （一氧化二氮）、 O_3 、 CO_2 、 H_2O （水汽）连同人类活动产生的氯氟烃气体 (CFC) 是关键要素。

然而 我们的温室并不会真的以这种理想的方式工作 它们的功能大多来自它们捕获靠近地面层暖空气的能力。大气层的温室也同样不那么理想。例如，水汽是最强的温室气体，但阳光并不能完全透过它。而且它往往会形成云，而云对控制大气的温度非常

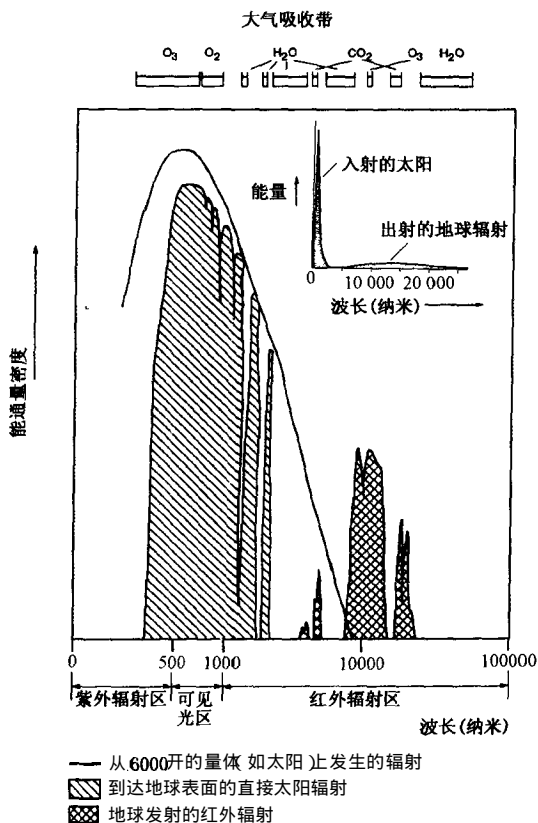


图 2.5 另一张地球入射和出射能量略图，这是随辐射的波长变化的。其中的小图表明，入射的太阳辐射的波长大部分在光谱的短波或可见光区，而出射的地球辐射则主要在红外光区或热辐射区。主图则更详细地说明了这一点，但这图两个坐标轴都是用对数来表示的。太阳辐射在入射时，部分被各种吸收气体吸收（见图 2.3）。右边给出了出射辐射，它通过光谱中红外线谱段的交叉线阴影区而逃脱捕获。在图的顶部给出了大气随波长的主要吸收带。臭氧、氧气和水汽对入射辐射有影响，而臭氧、二氧化碳、水汽和各种微量气体则对离开地球的出射辐射有影响。

重要 超过 CO_2 直接作用的 100 倍。云制约着到达地面的辐射，而且当辐射返回太空时云还控制着返回太空的辐射。要说明这一

点很简单，作个对比便明白了。秋天里的一个晴天，白天阳光明媚 暖融融的 但晚上却结了霜 而在秋天一个潮湿多云的天气里，有可能白天要比晴天冷得多，但晚上却没有结霜。

人们现在对云了解得还不太多，但已有有效的证据表明在总体上它们使地球变冷。云有两种作用。云的底部吸收地表——地面或海面——发射的辐射，它通常比地表温度要低。而云的顶部更冷，并向太空发射辐射。净平衡指云像毯子，通过捕获热量来保护地球。积云，尤其是在印度洋和印度尼西亚的季风区上空经常见到的那种，起着很大的类似于温室的作用。然而，云还有第二种作用。它们是白色的，因而在顶部它们把短波太阳辐射反射回太空。向太空的反射有一个冷却效应。云的最大的冷却效应发生在北半球中、高纬度的海洋的上空。在这些地区正如爱尔兰人或纽芬兰人所熟知的，大片的云使辐射加热减少了 100 瓦/米^2 。

云的温室效应是大气中 CO_2 加倍所造成的影响的许多倍。而云的冷却效应更大，是其温室增温效应的 1 倍半。大体上净作用是：与假想的无云地球相比，云使地球冷却 $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 。因此云使地球变冷。总的来说，冷却效应主要与地球的天气系统有关，如果天气型改变，那么这种平衡就会发生显著的变化。因为这种效应比其他气体的温室效应大得多，所以如果改变了地球上空的云的分布，例如通过改变植被类型，尤其是在森林地区，或者通过改变北大西洋地区的天气实现云的分布的改变，那么推测气候可能会有重大变化。

下面我们来更详细地讨论各种温室气体的作用。除了水汽， CO_2 是最重要的， CH_4 也很重要。如果大气中增加了这些气体的分子，温室效应将会增强。增加一个 CH_4 分子比增加一个 CO_2 分子其温室效应要大得多。这当中部分原因是由于大气中 CH_4 远少于 CO_2 。 CO_2 活跃的大气窗区已经部分地被 CO_2 所关闭 而 CH_4 的窗区仍是相当开放的。近来，大气中已增加了人造的氯氟烃 即使与 CH_4 相比，它们也是很强大的温室气体。每一个 CFC

分子的温室效应比一个 CO_2 分子大几千倍。

在过去的几十亿年里，大气中的温室效应可能已经慢慢地减弱。在早期的地球历史中，太阳可能比较暗淡但地球大气的温室效应很强，因此尽管太阳的入射能量较少，地面仍存在液态水。而离太阳近得多的金星也可能有液态海洋。随着时间的推移，太阳变亮了，而地球大气的温室效应必须减小；如果这种温室效应的不减弱，那么地球的表面温度可能已经显著升高，也许会把海洋烧干。相比之下在金星上温室效应没有减弱，因此在那里海洋最终消失到太空中去了，而失去控制的温室效应使金星的地面增温到现在的 470°C 简直是一个地狱。

在过去 10 亿年的地质记录里，地球表面的温度有经常是很显著的波动，但从未超出适于生物生存的范围——海洋维持了复杂的生物有机体。二叠纪出现过大的冰川作用 相比之下，在白垩纪，甚至北极都是温暖的。再往后，在第三纪，温度发生了很大的变化。在地质史上距今相当近的约 4000 万年前，在近北极地带都有森林，而在北极地区的河里还有鳄鱼，而到距今 1.5 万年至 1 万年以前，北方大陆的大部分地区，差不多包括加拿大全境都为冰雪所覆盖，并且至今南极和格陵兰仍有冰盖。

在这些变化过程中，生物也对气候产生影响。在气候温暖时期，石灰岩、煤以及石油的大量产生和形成从大气中除去了许多 CO_2 ，减小了温室效应，而在气候寒冷时期，植物比较少，从大气中除去的碳也比较少。火山爆发是没有什么规律的，但在地质时代的尺度上，大气中 CO_2 的增加却是持续的；同样，生物有机体也从生物圈中支取碳，把它固化为煤或石油，或者固化为石灰岩，其中有一些最终又返还给生物圈。

生物对地球的反射性和地球颜色的影响

行星的反射性对控制其表面温度非常重要。一个物体或表面的反照率是指其反射辐射与入射辐射之比。这个比率依赖于多种