

CO₂ 引起的温室效应及其经济影响

THE GREENHOUSE EFFECT OF CO₂ AND ITS ECONOMIC EFFECT

茅于軾

温室效应

太阳将能量辐射给地球表面，同时地球又以同样的方式将能量向宇宙空间发散。这两个过程维持着地球能量的收支平衡，保持地表温度的长期稳定。但是，地球向外发散能量是低温热辐射，这种辐射主要是红外线，它很难透过 CO₂ 气体。因此，CO₂ 在大气中含量增加时，地球向外辐射的能量减少，从而产生辐射差额，使地球表面的温度上升，并平衡在较高的水平上。这就是大气中 CO₂ 增加引起的地球温室效应。

上面的分析只是一种理论推测，实际上这个过程是否存在，特别是在数量上对地表温度的影响有多大，必须通过实地观察作为佐证。可是无论是观察大气中 CO₂ 含量或是地表温度变化都存在一系列复杂的因素影响测量数据。例如，不同地点及不同季节测出的 CO₂ 含量是不同的，因为有人类活动的影响，有不同季节植物生长吸收 CO₂ 的影响，所以

靠近人烟密集区含量较高，冬末春初时含量也较高。地表温度的变化则有当地逐年的气候特点和地球冰河周期性的变化在交错影响。在许多复杂因素作用之下，必须有长期的观察资料，才能排除它们的影响，找出大气中 CO₂ 含量与气温变化的关系。可是在人类历史中对这些数据的精确测量并没有足够的记录，特别是 CO₂ 含量的全球性分析到 50 年代末的全球地质年才开始。所以温度效应是否存在有过很多争论。直到 80 年代观测数据的进一步积累和实验室工作的进展，温室效应的存在才得到科学界的承认。现在已经设计出复杂的计算机模拟程序，可以分析 CO₂ 的变化如何受各种因素的影响以及它们可能产生的气温变化程度。

CO₂ 是一种无色无味的透明气体，但三个波段的红外辐射却不能透过它。它在大气中的含量目前只有 0.03%。远古时代大气中 CO₂ 的含量曾经用两极冰层内所保留的气泡作化验来察知。最早的直接测量是在 1882 年，虽然不够精确，而且只是地球上少

数几个点的测量结果，却是可以直接利用的数据。根据以后的测量和研究倒推，在 1850 年全球大气中 CO₂ 的平均含量为 270 ppm (ppm 为百万分之一)。1957 年增加了南极观测站，1959 年夏威夷观测站开始工作，70 年代初又增加了阿拉斯加站和南太平洋中部的萨摩亚站。现在全球已有 22 个常年观察站，连续观测的结果不但更为可靠而且更便于分析。现在 CO₂ 在大气中的平均含量已经接近 350 ppm，含量上升的结论已得到公认。

大气温度变化的记录有较长的历史，至少已有 100 年的可靠连续记录*。虽然记录的地点仅限于北半球的几个科学发达国家之内，但这些测量点的温度与全球平均温度之间的关系不难从现在的记录建立起来，从而可以推测过去全球平均气温的变化。更早期的气温情况虽然缺乏直接记录，因为温度计的发明是 1709 年

* 1817 年德国洪保德制成世界年平均气温分布图，1874 年丹麦霍夫迈尔绘制北半球天气图，1887 年奥地利汉恩发表全世界等温线图。

的事，但地质和考古研究提供了许多间接的证据。从这些分析可以找出气候周期性变化，再将它从过去百年来的变化中除去，剩下的变化可以归因于 CO_2 浓度增加的影响。将 CO_2 含量变化和气温变化的关系综合起来，可以肯定两者之间确实存在着密切关系： CO_2 在大气中的含量增加会使大气温度上升。

80 年代以来，科学家们建立了许多确定 CO_2 含量和大气温度之间关系的计算方法。他们推测 CO_2 含量加倍（从上世纪末的 300 ppm 算起）时大气温度将上升的程度。不同的假设和方法得出不同的结果，它们之间的差别是很大的。几十个比较简单的一维和二维模型的测算值平均值分别为 2.0°C 及 1.8°C ；最复杂的三维模型中最高测算值为上升

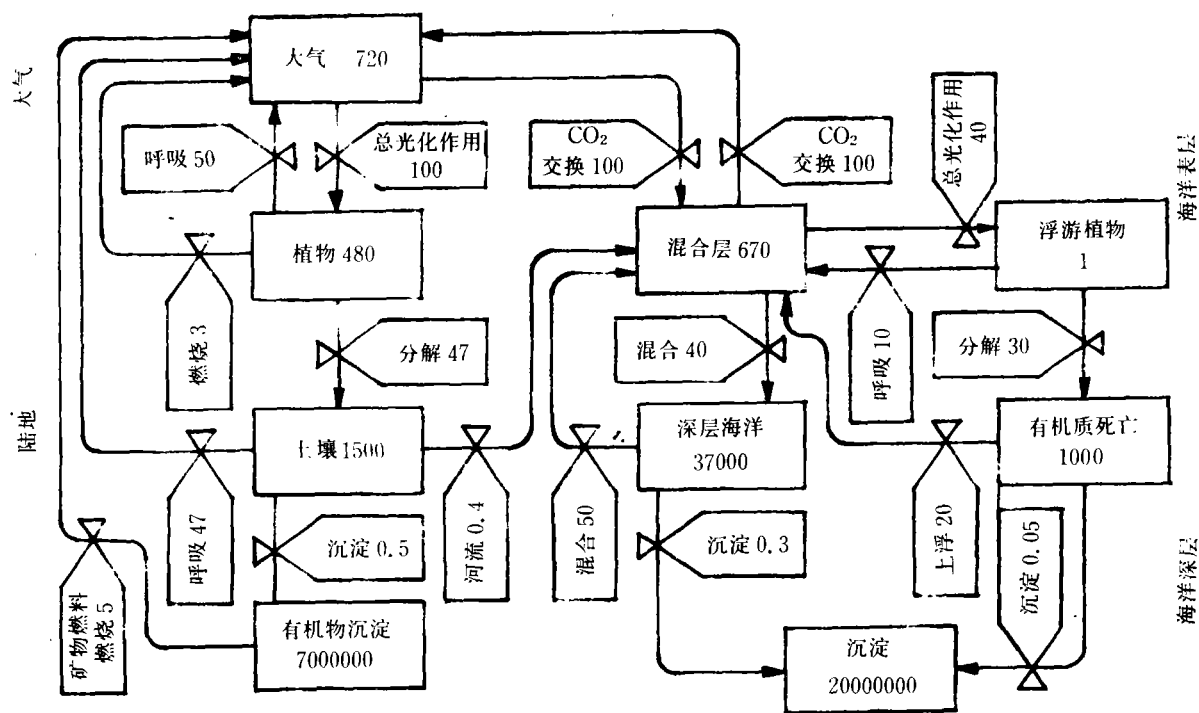
3.9°C ，最低的仅 0.2°C ，其平均值为 2.5°C 。现在我们常说的 3°C 温升是将这些计算结果略为夸大了一些的说法。

碳在自然界中的循环

为什么近百年来 CO_2 在大气中的含量骤然上升呢？这要从碳元素在自然界中的循环谈起。

碳是一切有机物的构成要素。植物的干质中约有一半的质量是碳，动物（包括我们人类本身）从毛发到内脏都由碳氢氧和少量其他元素组成。在人类活动大规模地影响自然界之前，自然界的碳循环由植物通过光化作用吸收大气中的 CO_2 ，动植物死亡腐烂和呼吸产生 CO_2 保持着平衡。大气和海洋是两个最大的碳储存库，在平衡循环时内中存留

的碳表面上看来其数量几乎不变，因为它虽然参与了新陈代谢的化学变化，但其收支大体平衡。上面的描述只是一个极粗的轮廓，具体参与变化的还有土壤中的微生物，海洋中的浮游生物（它们都含丰富的碳）。海洋及陆地的有机物积存（生成石油和煤炭的过程），以及碳矿化为碳酸盐的过程在进行着。人类社会进入工业化之后这个过程受到很大干扰，主要是大量矿物燃料被消耗，其中的碳燃烧生成 CO_2 排向大气。每年因而新增约 50 亿吨碳，或约 180 亿吨 CO_2 进入大气。其次是大片森林被毁，使植物从大气中吸收 CO_2 的总量减少，结果使得大气中 CO_2 含量迅速上升。科学家估计现在碳在自然界中的循环和储存可由下图表示。



碳在自然界中的循环和储存。长方形框表示储存场所，框中数字表示储存总量；三角阀门框表示循环，数字表示一年的流量。单位为 10 亿吨。本图取自 Vaclav Smil: *Energy, Food, Environment*. 1987, Oxford Press, p.255

海洋吸收 CO_2 依靠两种作用。一是占全部海洋容积不到

2% 的几十米厚的表层海洋，通过风浪、泡沫（内中的气压由于表

面张力的作用比大气压高）和温度变化的作用将大气中的 CO_2 直

接溶解入海水,但这部分的作用只占全部海洋吸收 CO_2 的约 20%,相当于每年约 5 亿吨碳,为现在一年中新进入大气的碳的 $1/10$ 。二是表层海水与深层海水的交换,使有较大吸收能力的深层海水与大气接触而吸收 CO_2 ,这部分占了每年海洋吸收 CO_2 的 80%,估计为每年 20 亿吨碳。上述估计说明大气中由于燃烧矿物燃料而每年新增的约 50 亿吨碳中,有一半为海洋所吸收,另一半残留在大气中,使 CO_2 的含量上升。

表层海水与深层海水的交换过程十分缓慢,全部交换一次大概要 800~1 000 年。上述两个过程中前一过程与大气中 CO_2 的浓度有关,浓度越高, CO_2 的分压越大,表层海水吸收 CO_2 的量成正比地增加。可是这一部分不是海洋吸收 CO_2 的主要机理。所以人类消耗的矿物燃料增加时,燃烧产生的 CO_2 中更大部分将留在大气中。相反,如果人类能将矿物燃料消耗减少到目前消耗量的一半,大气中 CO_2 的浓度可以不再上升。

现在大气中 CO_2 所含的碳总量估计达 7 000 多亿吨。无论 CO_2 的浓度有多高,大气中含的碳和海洋吸收的碳最终会达到平衡,或者说,大气中多余的碳会被海洋所吸收。但这个平衡要靠缓慢的表层海洋和深层海洋的交换,所以平衡过程非常缓慢。因此一旦我们发现 CO_2 在大气中的浓度太高,威胁人类的生存时,我们却无法立刻改变这一情况。即使立刻大量削减矿物燃料使用,也要几百年后大气中 CO_2 的含量才能降低到可接受的水平。

温室效应的经济影响

改变碳元素在自然界内的循环和分布,对人类社会可能产生极深远的影响。现在已经肯定的主要影响有两方面,一是温室效应使大气温度上升,二是植物生长的速度和地区分布的改变。

温室效应的后果非常复杂。首先是海水的平均温度上升,体积膨胀,再加上两极(主要是南极)冰山部分地融化,结果使海平面上升。有一些经济地理学家已经计算出海平面上升不同的高度将淹没的地区,以及这些地区不可移动的财产损失,并且比较了用筑堤坝的方法防止海水入侵何者较为经济。如果大气温升 $3\sim 5^\circ\text{C}$,南极冰帽将基本消失,海平面将上升 4~5 米。影响最大的是亚洲人口密集的沿海地区,包括恒河、湄公河、伊洛瓦底江、长江、珠江入海口,以及印尼人口密集的岛屿。但物质财富损失最大的是欧洲及北美沿海城市。如果海平面上升 4.6 米,美国大陆 48 个州将减少 1.5% 陆地面积,将有 6% 的人口迁移,有 6% 的不可搬动的财产损失。但这一过程将在 100 年内发生,大部分财产不等海水淹没已将自行报废,实际损失会大大地小于此数。即使将上述损失夸大一倍,每年也仅 20 亿美元,只相当于美国政府每年对牛奶业的补贴,比目前军费开支小两个数量级。

气温上升,大气中包含的能量增加,会使气流更其活跃,蒸发更其旺盛,降雨也相应增加。但计算表明,温室效应并不是使全球气温均匀地上升,而是赤道附近上升得少,高纬地带上升得多。降雨也不是均匀增加,也是高纬地带增加得多,低纬地区甚至会变得更干旱。此种变化会使台风频发区北移,冬季海水结冰

线朝两极移动约 15° ,这会改变世界航运通道,从而影响地区的经济布局。北部地带植物生长期延长,再加上降雨分布的改变,作物分布将有很大的调整,有些地区受益,有些地区受损。降雨分布的变化也使各地洪涝灾害的规律改变,有些水利工程不再起作用,另一些新的工程成为必要。影响最大而且不可逆转的是一些生物种族将灭绝。此外,一些传布疾病的昆虫如蚊、蝇,和水生生物如钉螺,他们的分布规律也会改变,而且病菌本身的繁殖可能变得更容易,因此从食物保鲜到流行病都会出现新问题。气温上升当然会改变人们对采暖和空调的需要,并进而影响这些设备的制造业。

大气中的 CO_2 虽然只有 0.03%,但植物全靠这稀薄的 CO_2 进行光化作用,生长出叶茎根和果实。根据模拟温室实验,当 CO_2 浓度加倍达到 700 ppm 时, C_3 型植物(15 种主要农作物中土豆、小麦等 12 种属 C_3 型)的产量可增加 20~45%, C_4 型植物(18 种危害最大的杂草中 14 种是 C_4 型)的产量可增加约 10%,因此这种变化将大有利于农业。不但如此,由于光化作用过程加速,植物对水份利用的效率可提高 $2/3$,因而原来比较干旱不适于种植作物的地区可以成为农业区,而且植物抵御病虫害的能力提高。有一些盐碱地可以改造成宜耕地。

对 策

大气中 CO_2 浓度增加的利弊,现在还未能作深入的定量分析。可以肯定的是,这将是一个对人类陌生的环境。万一发现这种环境有一些严重后果不能接

受, 我们已经无法从那里退转回来, 这是真正的危险所在。为了安全起见, 应该设法减少人类活动中 CO_2 的排放。这是多数学者的意见。

大气是世界各国共同的环境, 因此减少 CO_2 的排放不是任何一个国家单独的责任。但当这个问题被摆到国际会议上讨论时, 就会发现一些复杂的情况。

从技术上看, 用原子能代替矿物燃料可以避免 CO_2 的排放。但近几年来发达国家越来越抵制原子能的使用。有的国家已通过公民投票禁止发展原子能, 一则因为放射性物溢出造成巨大危险, 二则反应堆的废弃物至今未有妥善的处理办法, 退役后的反应堆址的防护费用很高, 而且恐怖分子还可能偷窃反应堆废料的后处理产物钚, 几公斤钚就可以制造一枚原子弹。另一类减少 CO_2 排放的办法是利用可再生能源, 包括水力、太阳能、风力、地热、潮汐能等, 以代替矿物燃料。但是在发达国家内水力资源早已广泛加以利用, 剩余的可用资源已经不多。其他各种能源有的因只能间断地供能, 有的成本太高, 有的有其本身的环境问题, 都不是理想的能源。

各种不同的矿物燃料中含碳高的燃料使用中产生的 CO_2 多, 如煤炭; 含氢多的燃料使用中产生的 CO_2 少, 如天然气。因此用天然气代替煤炭甚至石油, 可以减少 CO_2 的排放。但这也不是长久之计, 因为天然气资源也是有限的, 目前探明的可采储量在热值上和探明的石油可采储量差不多, 何况有些国家煤炭很丰富而天然气很贫乏, 象中国就是一个例子。生物质能, 如薪柴、秸秆也是可再生能, 只要后续生产不间断, 利用生物质能就可以减少

CO_2 的排放。可是生物质能要靠光化作用合成, 生长缓慢, 占用土地面积大, 不但采集运输成本很高, 而且还涉及到土壤中氮磷元素的循环利用。

从经济上看, 限制 CO_2 的排放, 与不加任何限制相比较, 显然会增加一些生产成本或生活开销, 可是得到的好处却是全球性的。这里存在一个耕耘和收获相脱节, 责任和利益不一致的问题。有一种分析方法是誰对增加大气中 CO_2 浓度负有责任, 谁就应该负担这额外的费用。可是该谁负这个责任也是难于分析确定的。一些发达国家的分析家认为, 未来几十年内发达国家耗用的矿物燃料数量大体上不会增加, 增加的主要是发展中国家在工业化过程中的消耗, 因此发展中国家应对未来 CO_2 的浓度增加负责。可是发展中国家的分析家却持相反的理由: 现在穷国的人均能源消耗不到发达国家的几分之一, 如果发达国家的人均能耗和发展中国家一样的话, 根本不会出现 CO_2 浓度增加的问题, 可见减少 CO_2 排放的经济负担应由人均能耗高的发达国家承担。处于上述两种意见之间的折衷办法是大家都分担一些。但是均匀分摊发生两个问题。一是减少 CO_2 浓度受益并不是均匀的, 沿海有人口密集城市的国家可能受益更多一些。二是经济上的平均负担, 对贫富程度不同的国家是不公平的。例如让人均国民生产总值达 2 万美元的美国人每人每年拿出 1 000 美元来治理 CO_2 排放, 并不会对他们的生活水平造成严重影响, 但对于大多数欠发达国家来说, 他们的人均国民生产总值还不到 1 000 美元, 要拿出 1 000 美元用于减少 CO_2 排放, 就不再有闲钱来维持温饱。

尽管如此, 作为发展中国家, 我们还是可以寻出一些办法, 既不增加经济负担, 同时也可以减少 CO_2 排放。首先是减少森林火灾, 因为森林火灾不但直接产生 CO_2 , 而且减少了植被从大气中吸收 CO_2 的能力。其次是广泛植树造林, 不但有利于减少大气中的 CO_2 , 而且可以保持水土, 改良气候, 保护珍稀生物。第三是开发水力资源。特别在我国, 水力资源之丰富居世界第一, 而开发利用程度却踴乎其後, 现在还有许多地质条件好, 水库移民少, 投资省, 环境影响小的优良坝址可以开发。最后, 也是最重要的是开展节能。大多数发展中国家能源利用效率都很低, 造成能源的巨大浪费。我国能源价格偏低, 已是多少年的老问题。煤炭是全行业亏损, 采油业实际上也处于入不敷出的窘境。国家通过对这些能源生产者的补贴, 保持能源低价格, 实际上是补贴了能源的用户, 从经济上鼓励他们多消耗, 耗能越多享受的补贴也越多。在基本建设方面国家对新建煤矿, 开发油田, 兴建电站等从来也不吝啬, 即使在财政困难时也要拨出能源建设专项基金。但是在节能投资方面却从来没有下过同样大的决心。节约 1 吨能源消耗比之增加一吨能源生产, 不但所需投资少得多, 而且减少自然资源的消耗, 减轻对运输的压力, 减少对环境的污染, 当然也减少 CO_2 的排放。这说明我们对解决我国能源问题的各项政策考虑中, 在思想方法上要有一个根本性的改变。

本文作者茅于軾 (Mao Yushi) 系中国社会科学院美国研究所副研究员。