第一章　温室效应——人类面临的最严重的挑战

地球已有 45 亿年的历史。在其形成初期，地球被氢气层包裹着，随后氢气消散，气层中充满氦气和二氧化碳等气体，非常类似于今天观测到的金星大气和火星大气。直到大约 38亿年前，地球环境才逐渐变得适合生命的产生和生存。根据化石记录推断，最低等的生命形式——单细胞的水生藻类植物，已经在地球上生存了 35 亿年。藻类及以后进化出现的各种植物，通过光合作用，逐渐改变了大气成分，使大气中的二氧化碳气体降低到目前的浓度，约占大气总含量的 0.03%左右，而氧气则增加到 20% 左右。在漫长的岁月里，地球环境历经了翻天覆地的变化。各种生物在进化过程中自然竞争，保留下来的生物适应了地球环境及其变化，也对地球环境产生影响。

对地球环境影响最深远的因素，一是自然界内部各种驱动地球环境演变的因素（即自然驱动力），二是人类出现后的人类活动。前者是一直存在的，而后者，则是近百万年来人类出现并不断进化中产生的，人类活动开始能够比较显著地改变局部环境也不过数千年或近万年。二百多年前的工业革命吹响了人类文明飞跃发展的号角，通过学习、研究和掌握各种技能，人类的活动才最终成为驱动人类自身生存环境，使其产生变化的一个新动力源。

当前近代以来，全球出现了几个重大的环境问题，如酸雨沉降、臭氧空洞和地表状态变化（如土地荒漠化、大规模毁林等）引发的土地利用问题等，尤其是大气中的某些成分或温室气体（如二氧化碳、甲烷等）的含量近百年来有了急剧的增加，导致全球变暖。这些重大问题是彼此相关的，也都和人类经济建设和生存发展息息相关，这些问题的出现在一定程度上都和人类活动密切相关。

1—1　能源与人类社会发展

人类社会发展进程中，能源一直是社会和文明发展的原动力。能源的开发和消耗与世界人口的增长紧密相关，尤其自工业革命以来，世界的能源消费及人口有了急速的增长。

地球的生命史主要依赖于它所获得的太阳能以及通过植物的光合作用进行的能量转换。植物通过生物化学过程把能量转化为其它的有机化合物与功。光合作用总是使无序的物质变得更有序，从而使熵减少。通过获得太阳能及减少地球的熵，光合作用为生命进化铺平了道路。事实上，地球生命需要一个由光合作用而获取太阳能的连续负熵流。太阳是一个巨大的能源，它产生能量，并给了地球能吸收大量负熵的可能性。每年太阳发射给地

球的能量为 5.6×10^{24}J，并通过光合作用产生 2×10^{11}t 有机物质。这一过程使大量的能量积聚在各种碳氢化合物中，大部分化石燃料都源于此。人类所需能源在很大程度上依赖于化石燃料中所储存的化学能。表 1-1 示出了 1994 年世界不可再生能源的储量。

表 1-1　1994 年世界化石燃料探明可采储量

煤炭（Gt）			石油（Gt）			天然气（Tm^3）		
世界总计		1043.86	世界总计		137.3	世界总计		14.1
1	前苏联	241.0	1	沙特	25.7	1	前苏联	5.6
2	美国	240.56	2	伊拉克	13.4	2	伊朗	2.1
3	中国	114.5	3	科威特	13.3	3	卡塔尔	0.71
4	澳大利亚	90.94	4	阿联酋	12.7	4	阿联酋	0.53
5	德国	60.07	5	伊朗	12.2	5	沙特	0.53
6	印度	69.59	6	委内瑞拉	9.3	6	美国	0.46
7	南非	55.33	7	前苏联	7.8	7	委内瑞拉	0.38
8	波兰	42.1	8	墨西哥	7.3	8	阿尔及利亚	0.36
			9	美国	3.8	9	尼日利亚	0.34
			10	中国	3.3	10	伊拉克	0.31
						11	中国	0.17

表 1-2 给出了世界各国及地区的一次能源消耗。

表 1-2　1996年世界各国和地区一次能源消费量统计（Mt 油当量）

国家及地区	石油	天然气	煤	核能	水电	总计
北美	986.3	663.7	544.3	209.1	61.6	2464.9
美国	833.0	569.2	516.0	183.3	28.8	2130.3
加拿大	79.5	66.4	23.1	23.9	30.3	223.1
墨西哥	73.8	28.1	5.2	1.9	2.5	111.5
中南美	203.7	75.5	18.3	2.5	41.5	341.4
欧洲	740.1	376.4	380.1	242.3	45.7	1784.3
奥地利	11.4	6.6	2.3	—	3.1	23.5
比利时/卢森堡	28.7	11.6	9.1	10.7	0.2	60.2
	10.3	3.0	3.9	5.1	1.0	23.2
芬兰	91.0	29.0	14.7	102.8	6.0	243.4
法国	137.4	75.2	88.9	41.7	1.8	345.0
德国	94.1	46.9	11.7	—	4.0	156.8
意大利	37.4	37.5	9.3	1.1	< 0.05	85.3
荷兰	16.9	9.5	72.0	—	0.3	98.8
波兰	58.7	8.4	15.4	14.5	3.6	100.6
西班牙	17.4	0.8	2.4	19.3	4.4	44.3
瑞典	12.2	2.2	0.2	6.4	2.6	23.6
瑞士	28.8	8.1	20.7	—	2.6	60.1
土耳其	83.7	76.7	44.9	24.5	0.3	230.1
英国	196.5	473.6	180.9	52.7	19.3	923.2
前苏联	128.0	317.0	119.0	28.1	13.2	605.4
俄罗斯	17.3	7.03	30.5	20.5	0.8	139.5
乌克兰	190.5	128.3	6.3	—	1.1	326.1
中东	110.3	43.1	89.7	3.2	6.2	252.4
非洲	885.4	211.0	1037.4	111.5	42.7	2287.8
亚太	35.7	17.2	42.9	—	1.4	97.1
澳大利亚	172.5	15.9	666.0	3.7	15.9	874.0
中国	35.3	4.0	19.3	9.7	0.8	69.2
台湾省	78.7	19.5	140.3	2.1	6.0	246.7
印度	42.9	27.1	7.5	—	0.7	78.2
印尼	269.9	59.5	88.3	76.8	7.4	501.8
日本	101.4	12.2	31.6	19.1	0.4	164.7
韩国	38.0	10.1	7.6	—	0.6	56.3
泰国						
世界总计	**3312.8**	**1971.6**	**2257.0**	**621.3**	**42.7**	**8380.1**

促进现代社会初期工业蓬勃发展的丰富能源曾给人一种假象，似乎人类文明发展战略可以基于这样一种设想：能源是无限的。事实却并非如此，资源是有限的。人们知道，能源的消费状况强烈地依赖于技术的发展。历史上有两个因素影响能源的市场，一是技术因素，另一是获得各种能源的难易程度。很明显，能源利用状况受到能源总水平的内在制约。图 1-1 示出了世界能源的消耗结构。

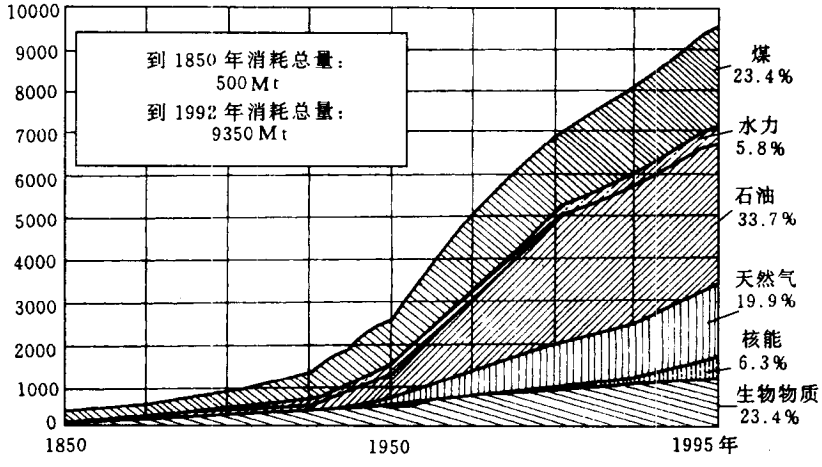


图 1-1　世界能源的消费结构

从原始社会一直到20世纪60年代，人类的社会、经济和科学发展史总体上是一部向大自然宣战、征服大自然并取得加速进步的历史。但是，伴随着人类在物质财富上的迅速积累、在资源开发上的加速前进，大自然和生活环境却变差了。产业革命以来的经济增长模式所倡导的“人类征服自然”，其后果是使人与自然处于尖锐的矛盾之中，并不断地受到自然的报复；这条传统工业化的道路，已经导致全球性的人口激增、资源短缺、环境污染和生态破坏。如果按照现在的趋势继续下去，地球上增长的极限将会在今后100年内发生，最可能的结果是人口和工业生产将出现不可控制的衰退。

在 21 世纪到来之际，无论是发达国家还是发展中国家，在基础建设和推进工业经济方面都会有重要进展和突破。因此对大多数国家来说，都将面临一个重要而艰难的选择：是按照传统模式，以大量消耗能源并加上牺牲生态环境为代价换取经济继续增长，还是进行一场革命，将消耗大量能源，尤其是化石燃料能源与经济发展两者之间的联系分割开来，或者将它们之间的依赖程度减至最小。美国《能源工程》最近发表评述指出，当务之急是规划好地球上仅存的有限化石能源，并积极开发新能源，尤其是再生能源，使已有的能源科技成果初步进入商业化。

科学和妥善地规划 21 世纪能源，不仅仅是个经济问题，而且涉及到政治风险。国际能源机构名誉主席格汉德·奥特最近指出，世界能源资源分布的不平衡，以及在能源消耗、占用上的巨大差异，是导致国家之间冲突的潜在因素，这种因素近 10 年来在世界经济活动中日益显现出来。世界能源消费结构是：石油约占能源的 40%，煤占 30%，天然气占 20%，核能占 6.5%，这表明化石燃料提供着世界 90%的能源，化石燃料是不可再生的自然资源，

总有一天会消耗殆尽，化石燃料作为人类文明的重要支撑还能维持多久？目前的情况是：能够列入统计的已确知的能源储备，石油还可用 42 年，天然气够用 67 年，煤炭还可用 200 年。目前正在走向统一的欧洲，其化石燃料储量仅占全球总量的 2%，但消费却占全球总量的 20%以上。即使是发展中国家，越来越多的例子表明对进口能源的依赖在加剧，包括原先的产油国在 21 世纪将变成能源进口国。

据经济学家们的反复论证，到 2010 年世界经济将发展到能源消耗的高峰时期，而届时世界上的石油储量够用时间已缩短到 30 年。统计分析表明，许多国家的工业化和经济复苏在很大程度上是依赖增加能源消耗而实现的。无论是 70 年代后日本经济的崛起，还是 90 年代以来美国经济的复苏，能源的大量进口发挥了重要作用。据测算，过去 8 年美国经济的持续增长，其 GDP 中的 1/5 是靠进口能源取得的。90 年代中期，美国人均石油消费是世界平均水平的 5.35 倍，是第三世界平均水平的 25 倍以上。显然，世界上的石油储量很大部分是在为美国及其他发达国家作贡献。图 1-2 所示为化石燃料的资源量与当年消耗量的比值。

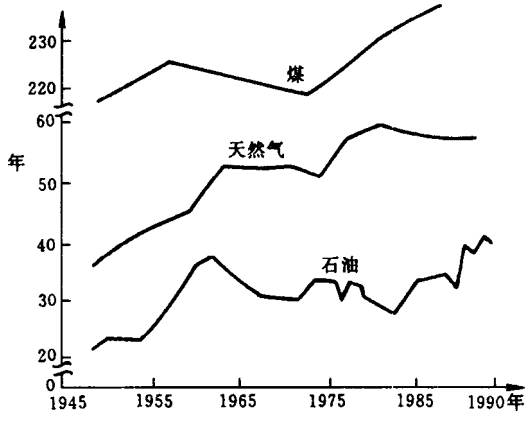


图 1-2　能源的剩余量预测

能源的消耗与人均能源消耗量及人口的增长有关，国民总产值和人均能源消费量之间有非常密切的关系。图 1-3 所示的是一些国家 1990 年的经济增长和能源消费情况[12]。

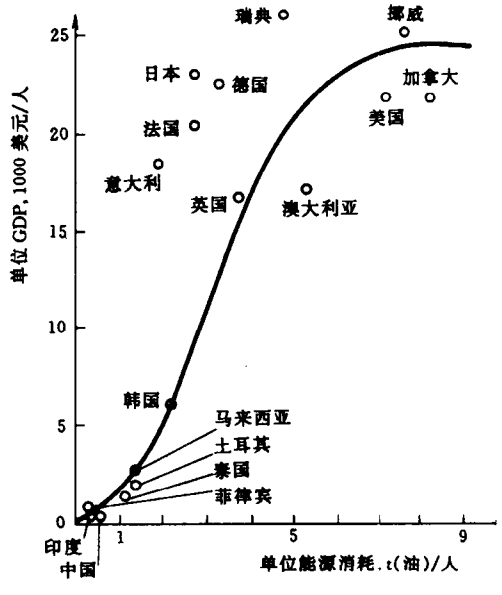


图 1-3　经济增长和能源消耗

有很多因素影响着对世界经济的发展，人口就是一个重要的因素。图 1-4 给出了世界人口增长的趋势，如果人口每年以 1%的速度增加，即为现有速度的 75%，那么到 2025 年世界人口将达到 85 亿；如果采取严厉的生育控制措施，使人口增长速度控制在 0.5%，那么 2025 年时人口为 76 亿；如果不控制生育，到 2000 年时年增长速度预计会达到 2%左右，那么 2025 年则人口总数达 94 亿。人口的增长趋势几乎与能源资源的消耗、二氧化碳的排放增长趋势具有十分相似的发展规律。

如果世界经济发展以现在的势头持续 50 年,则可预测出未来的能源消费趋势（如图 1-5）。

由此可以看出，能源的耗尽将是不久的将来人类文明所必须面对的现实。不管我们预测的方法和模型精度如何，可以断定，计算的不精确度只会影响时间的长短，而不会影响结论本身，那就是能源的耗尽过程正在开始，人类在严峻的现实降临之前必须采取行动。

自然资源不足与经济增长总是相互对立的。在 70 年代，各种能源的短缺都很严重。 80 年代情况依旧，将来能源短缺和经济增长会相互制约。但可以肯定，短期的能源短缺波动对长期的经济增长也有重要的影响。很明显，人们有必要在不可再生能源的短缺和它对经济的重要影响方面做出更加积极的努力。

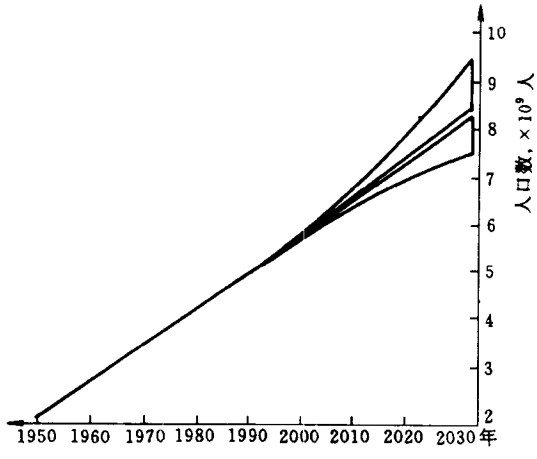


图 1-4　今后 30年的人口预测

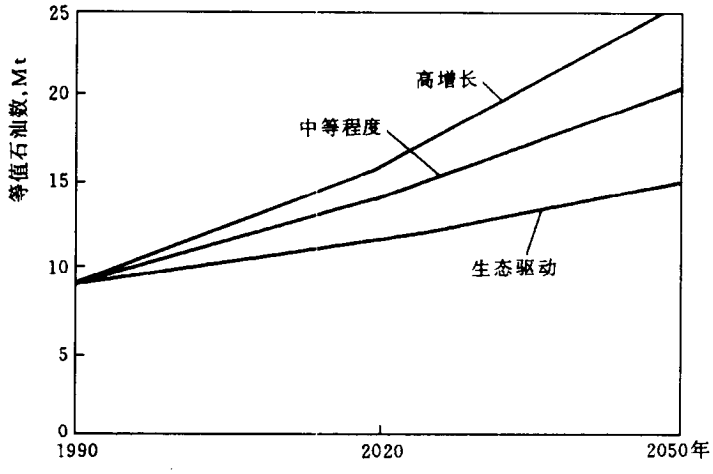


图 1-5　未来能源消耗预测

1-2　能源与环境

自工业革命以来，人类对自然资源大规模的开发，已造成全球范围环境和资源的迅速变化。海平面上升、气候异常、风暴潮、频繁发生的干旱和洪涝灾害、日趋减少的耕地和林地、严重的水土流失、水源和能源短缺、环境污染等环境、资源问题都已成为世界人类面临的难题。

80年代中期在南极上空发现了臭氧空洞，它与地球变暖即所谓温室效应和酸雨沉降问题一并构成了全球性大气环境的三大问题，明显地危及全人类的生存和繁衍，引起了国际社会的高度关注，使得当今的世界环境问题具有明显的时代特征。 1988 年联合国大会以及

1992年联合国环境与发展大会通过决议，要求把全球气候作为人类共有遗产的一部分，通过防止气候变化、臭氧层破坏和长程空气污染来保护环境。

一次能源的使用是造成生态环境破坏的主要污染源。现在 90%以上的能源都是由化石燃料提供的。然而，它们燃烧后所产生的有害物质量已达到了足以破坏全球环境的程度。大气中所聚集的 CO_2 已达 2.75×10^{12}t。很明显，CO_2浓度的进一步增加将会给环境带来灾难性的影响。同样 SO_2，NO_x及一些悬浮物质的影响也是非常可怕的。

在世界范围内，煤是发电的主要能源，很多发展中国家，如中国、印度等将继续大量使用丰富廉价的本地煤以满足经济增长的需要。现在，因煤炭利用造成的环境危害，其热点已经由酸雨转变为温室气体的排放。在中国，煤将继续是主要能源，估计从 1995 年到 2010年，它在一次能源中所占的份额不会低于 70%。1993 年中国煤的产量是 11.14 亿 t，2000 年计划是 15 亿 t，2010 年 20 亿 t。由于中国是继美国和俄罗斯之后的第三大能源生产国，如果考虑减轻 CO_2 战略，它对控制全球 CO_2 积聚的贡献将是非常大的。我国的例子说明，对发展中国家必须评价未来经济加速发展对能源的需求。

1-2-1 环境与环境科学

当今世界经济的发展和人类赖以生存的环境是很不协调的，经济发展和人口增长给环境的压力愈来愈大，而发展中国家的情况尤为突出，各种环境问题层出不穷，它们直接或间接地影响生态平衡，威胁着人类的健康和生存。但同时，人们的环境意识也在不断增强，保护环境、保护地球的呼声日益高涨，现在已经深刻地认识到人类与其赖以生活的环境是一个不可分割的整体，环境是人类赖以生活与生存的资源。Carson 的《静寂的春天》(1962)、Ward 和 Dubos 的《只有一个地球》 (1972)等著作的问世，表明人类对环境问题的觉醒，而 Watt 的《环境科学原理》 (1973)、Master 的《环境科学与技术引论》 (1974)、Strahler 的《环境科学导论》 (1974) 等经典著作的出版，标志着一门新兴的综合性科学——环境科学的建立。

从引起环境问题的根源考虑，环境问题可分为两类。由自然力引起的为原生环境问题，又称第一类环境问题，它主要是指地震、洪涝、干旱、滑坡、……等自然灾害问题。对于这类环境问题，目前人类的抵御能力还很薄弱；由人类活动引起的为次生环境问题，也叫第二类环境问题，它又可分为环境污染和生态环境破坏两类。

据联合国环境署的报告资料表明，整个地球的环境正在全面恶化，报告指出：

(1) 南极臭氧空洞正以每年一个美国陆地面积的速度在扩大，受臭氧空洞的影响，太阳紫外线辐射长驱直入，人类皮肤癌的发病率不断上升；

(2)空气质量严重恶化，全球有 1.25 亿人口生活在污浊的空气中；

(3)温室气体过度释放造成全球气候变暖，使沿海低地和一些岛屿国家处在岌岌可危之中；

(4)全球 12%的哺乳动物和 11% 的鸟类濒临灭绝，每 24h 就有 150 种到 200 种生物从地球上消失；

(5)全球有 12 亿人口生活在缺水地区，14 亿人的生活环境中没有生活污水排放装置；

(6)全球每年土壤流失达 200 亿 t;

(7)每年化学杀虫剂的使用量超过 270 亿 t;

(8)世界上有 10 亿人口主要依靠鱼类获取蛋白质，由于人类的过渡捕捞，全球海洋的鱼类资源已减少了 1/4 以上，捕鱼量已大大超过每年 1 亿 t 的上限，有 40 多种鱼类因人类的过度捕捞而濒临灭绝；

(9 全世界的森林正以每年 460 万 ha 的速度从地球上消失。

环境问题是一个全球性的问题。污染物可以在生物圈中停留相当长的时间，并且通过扩散或漂移输送到离污染源相当远的地方。因此，需要一个全球性的组织来管理、规划我们的环境。1992 年，联合国在巴西召开了“联合国环境和发展大会”，中国总理李鹏和国家科委主任宋健出席了这次大会，表明中国将同世界各国一道保护人类的生存空间——地球。

人类从来没有像今天这样意识和感受到生存环境所造成的威胁和危害。

社会从来没有像现在这样期盼和需求生活空间质量的改善和友好。

1-2-2 燃烧排放与酸雨污染

天然降水的本底 pH 值为 5.65，一般将 pH 值小于 5.6 的降水叫酸雨。可能引起雨酸化的物质有硫化物类、氮化物类及氯化物类，在三类物质中，形成酸雨的主要物质是 SO_2和 NO_x，它们形成的酸雨占总酸雨量 90%以上。这两类物质的 90%都是燃烧化石燃料造成的。我国酸雨以硫酸为主，硝酸的含量不到硫酸的 1/10，带有大气 SO_2 污染的明显特征，这与我国的以煤为主的能源结构有关。

70 年代初，酸性沉降在世界上还是局部性问题，但后来已发展成为全球面临的主要环境问题之一，与全球变暖和臭氧层破坏一样，受到人们的普遍关注。进入 80 年代后，酸雨的危害更加严重，并且扩展到了世界范围。原先多发生在北欧国家的酸雨已扩展到中欧和东欧，而且程度也更严重。据欧洲大气化学监测网仅 20 年连续监测结果表明，欧洲雨水的酸度每年增加 10%，斯堪的纳维亚半岛南部、瑞典、丹麦、波兰、德国、捷克斯洛伐克等国酸雨的 pH 值多为 4.0~4.5。在北美地区，酸雨也成为棘手问题， pH 值为 3~4 的酸雨已司空见惯，美国已有 15 个州的酸雨 pH 在 4.8 以下，加拿大酸雨受害面积已达 120~150 万 km^2。酸雨的危害已扩大到发展中国家，其中一些地区的土壤酸化程度已经能够使森林遭到破坏。

大气中大部分硫和氮的化合物是由人为活动产生的，而化石燃料燃烧造成的 SO_2 和 NO_x排放，是产生酸雨的根本原因，这已从欧洲、北美历年排放 SO_2和 NO_x 的递增量与出现酸雨的频率及降水酸度上升趋势得到证明。由于燃烧化石燃料及施放农业化肥，全球每年约有 0.7~0.8 亿 t 氮进入自然界，同时向大气排放约 1 亿 t 硫。这些污染物主要来自占全球面积不到 5%的工业化地区一欧洲、北美东部、日本以及中国部分地区。近一个多世纪来，全球 SO_2排放一直在上升。

酸沉降是个区域性的环境问题，但由于气流的运动，各种污染物排放后不仅造成本地局部的空气污染，而且会随气流输送到很远，这种跨国转移已成为国际争论的热点。仅加

拿大东部，每年即从美国接受 600 万 t SO_2。

1998 年，在我国 322 个环境统计的城市中，空气质量达到国家二级标准的占 27.6%；处于国家三级标准的占 28.9%；低于国家三级标准属于严重污染型城市的占 43.5%。在国内 47 个重点城市中，空气污染最为严重的十大城市，依次为太原、北京、乌鲁木齐、兰州、重庆、济南、石家庄、青岛、广州、沈阳。据 1998年国际卫生组织公布的一项报告表明，全球空气污染严重的城市依此是：太原、米兰、北京、乌鲁木齐、墨西哥城、兰州、重庆、济南、石家庄、德黑兰。十个污染严重的城市中我国占了 7 个，北京名列第三，兰州名列第六。我国酸雨正呈蔓延之势，1998 年全国一半以上的城市降水年均 pH 值低于 5.6，酸雨在我国几成燎原之势，覆盖面积已占国土面积的 40%以上。其主要原因是以煤炭为主的能源结构造成的煤烟型污染严重。

由于酸雨对人类生存环境的破坏十分严重，早已引起各国政府的重视，特别是一些工业发达国家，业以研究开发和广泛应用了一些有效的手段和技术，降低造成酸雨的污染物的排放，并且取得了明显的成效。

美国 1940~1973 年由于经济发展致使能源消耗不断增加，人为经济活动的 SO_2排放量呈上升的趋势，1973 年的 SO_2排放量高达 2895 万 t，为美国历史上 SO_2 排放量最高的年份，之后四年 SO_2 排放量稳定在 2400 万 t左右。1978~1983 年 SO_2排放量逐年下降，1983年排放量为 2070 万 t。这十年中尽管燃煤量增加，而 SO_2排放量则削减 28.5%，大气中的 SO_2 浓度降低了近 35%。日本 1970 年的 SO_2 排放量 500万 t，1981 年降到 110 万 t，11 年间 SO_2 总量削减了 80%，SO_2浓度下降了 60%左右。16 年里(1965~1981 年)日本解决了本国 SO_2 严重污染问题。英国 1970~1983 年(13 年)SO_2排放量削减了 40%；原西德 1983~1988 年(5 年)SO_2 排放量削减了 67.5%。发达国家 70 年代、80 年代前几年是大幅度削减 SO_2 排放量的集中年代，并取得显著效果。图 1-6 示出了美国、欧共体、德国、日本和中国近数十年和未来的 SO_2 排放量的变化和减量目标。

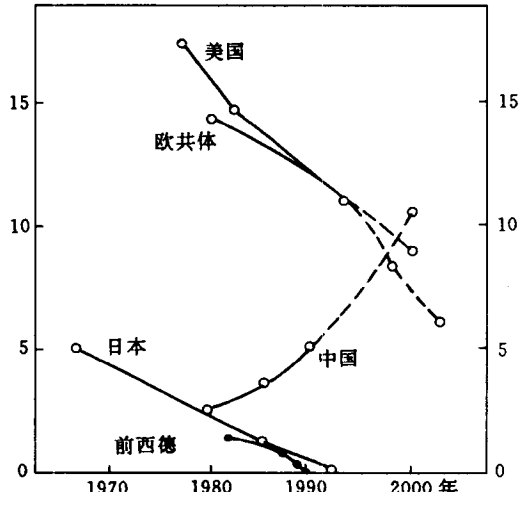


图 1-6　电厂 SO_2 的排放

美国降低 SO_2 污染的主要技术措施有：①洗煤率高达 60%以上；②增加低硫煤开采与使用量；③大规模采用烟气脱硫装置等；④大力采用循环流化床燃烧技术。发达国家除了依靠技术措施外，还广泛采用一切经济手段，控制 SO_2 排放，“以法治污”，其中征收 SO_2 排放税就是一项重要措施。瑞典的酸沉降物 80%来自国外，国内严格限制 SO_2 排放，

实施规定每排放 1t SO_2征收 227 美元，是我国二省九市征税标准 1200 元(折 23 美元)的近十倍；波兰从 1983 年开始，每排放 1t SO_2 征税 65 美元，也是我国的近 3 倍。

1-2-3 臭氧层的破坏与燃烧排放

直到 1974 年，化学教授马利奥·莫利纳(Mario Molina)和舍武德·罗兰(F. Sherwood Rowland)提出诸如氟里昂之类的 CFCs 最终能够对地球臭氧层造成 20%以上的破坏时，向空中释放烟气的危害性才被认识。莫利纳和罗兰的可怕预言，直到 1985 年才被持怀疑态度的人接受。当时英国学者约瑟夫．法曼在《自然》杂志上发表文章指出，南极上空臭氧层有一个很大并且还在继续扩大的空洞。 1988 年大气化学家 Susan Solomon 领导的南极考察队进一步证实，氯氟烃火箭推进剂是造成臭氧空洞的因素，这与预言的完全一样。

没有臭氧层，紫外线会穿透海洋表面杀死海中细胞壁很薄的浮游生物。这些浮游生物对大气化学过程是很重要的，他们既是地球最大的碳吸收者，又是世界上氧气的最大制造者。由于浮游生物没有皮层，因此它们对紫外线辐射没有防护功能。

“臭氧空洞”是由氯的某些化合物的催化反应造成的，这些反应只能发生在很高、很冷的（低于 −80℃）云层中，并且还必须有阳光的存在。南极臭氧空洞是在南半球春季里出现的现象，极地涡流（即围绕南极大陆边缘持续涡动的气流）将臭氧空洞严格限制在南极洲的上空。

臭氧（O_3）是氧的同素异性体，在大气中含量很少，但其浓度变化都会对人类健康和气候带来很大的影响。

臭氧存在于地面以上至少 10km 高度的地球大气层中，其浓度随海拔高度而异。在平流层（离地面 20~25km）最高，但也不超过 5×10^{13} 分子／cm^3。臭氧在大气中的分布，见图 1-7。

平流层中的臭氧吸收掉太阳放射出的大量对人类、动物及植物有害的紫外线辐射（240~329nm，称为 UV-B波），为地球提供了一个防止有害紫外辐射的屏障。但另一方面，臭氧遍布整个对流层，却起着温室气体的不利作用。基于长期对全球臭氧分布趋势的监测，已经观察到，在平流层中臭氧含量减少，而在对流层中其含量有所增加。由于约有90%的臭氧在平流层，所以其总量在下降。

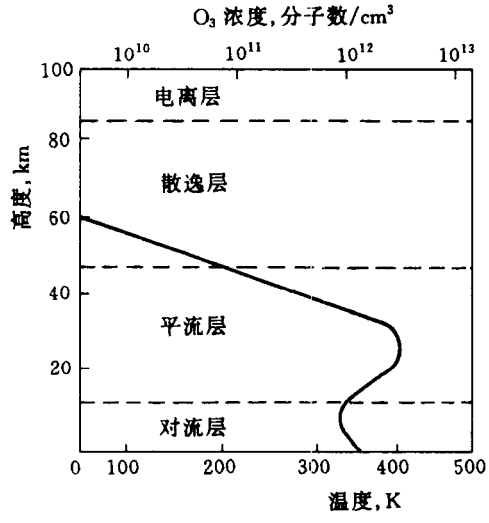


图 1-7 O_3在大气中的分布

1984 年英国科学家首次发现南极上空出现了臭氧空洞；1985年美国的“云雨-7 号”气象卫星测到了这个“洞”，其面积与美国领土相等，深度

相当于珠穆朗玛峰的高度。经过几年的连续观测，科学家发现，臭氧空洞通常在南极的春天出现，即每年从 9 月开始出现臭氧的减少，到 11 月中旬消失。据 NASA 科学报道，在 1991 年，南极臭氧浓度出现了有记录以来的最低值。 NASA 的"Nimbus-7" 号卫星上的总臭氧测定仪记录的数据表明，在 1991 年 10 月 6 日，臭氧洞中臭氧浓度为 110±6 Dobson ，而以前的最低值为 1987 年 10 月的 120 Dobson，正常的臭氧浓度应为 300 Dobson 。另外，1990 年的南极臭氧洞一直持续到 12 月，即南半球的夏季。在最严重的几天中，南极紫外辐射是前几年中最大值的两倍，并且比在中纬度下测量的夏季紫外辐射剂量还高。南极上空臭氧空洞示意如图 1-8。

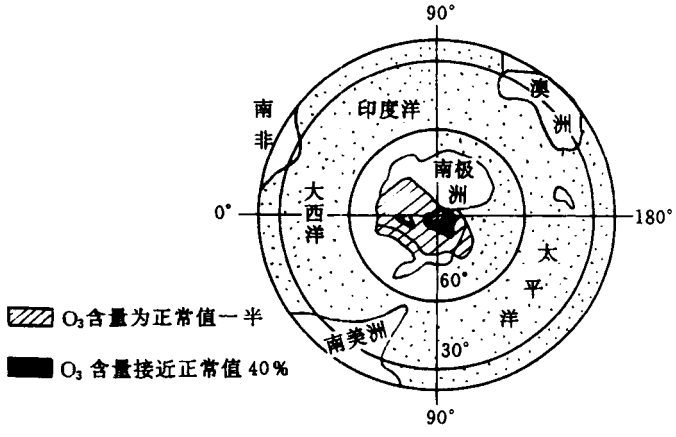


图 1-8　南极上空臭氧层空洞示意图

目前不仅在南极，而且在北极也出现了臭氧层减少的现象。NASA 的测定表明，1989 年北极臭氧层与 1970 年的测试结果相比，已经被吞掉 19~24km 深，而北半球其它地区的臭氧层也比 1969 年减少了 3%。欧洲臭氧层联合调查小组自 1991 年 11 月起，对欧洲、格陵兰和北极圈臭氧层物质氟氯烃等的浓度进行了调查，结果表明，欧洲上空的臭氧层比往年减少了 10%~20% 是历年来最低的，在德国部分地区上空，1991 年 12 月臭氧减少了 10%，而在 1992 年 1 月，比利时上空的臭氧减少了 18%。

上述一系列监测的结果表明，大气层中的臭氧正在日益减少，人们需要积极行动起来，研究如何拯救臭氧层。

对于臭氧层破坏的原因，有着多种见解，但与人类过多地使用氟氯烃（用 CFC_S 表示）类物质以及燃烧的排放物质有关是共同的认识。

如图 1-9，部分的 CFC_S 物质，由于其具有非同寻常的化学稳定性（如 CFC-11 在大气中的寿命为 75年，CFC-12 在大气中的寿命为 110年），因而可以在同温层积聚，其影响将持续一个世纪或更长的时间。强大的紫外线辐射引起它们光解而放出氯原子，于是氯原子夺去臭氧中的一个氧原子（一个氯原子能破坏近 10万个臭氧分子），从而使臭氧失去吸收紫外线的性能。

NO_x 是生成臭氧的一个重要来源，当臭氧处于平流层中为我们阻挡紫外线时，是对人类有益的。但当它下沉时会使 SO_2 氧化成硫酸，使 NO_x 变成硝酸，这些都是酸雨的组成部分。

它还被认为会直接导致对环境的伤害，特别在原西德的森林中，以前这被认为是由于酸雨造成的。

一般情况下，一氧化氮与由于大气流动而从平流层下来的臭氧反应生成NO_2和一个氧分子。阳光又会使NO_2分解成NO和一个氧原子(O)，这个氧原子又会与O_2反应生成O_3。这个反应进行得很快，并且与阳光的强度有关，但不会产生比原来更多的臭氧。但是当有烃基存在的情况下，它们会与烃基反应而后再与NO反应生成NO_2。当这些NO_2分解时，就产生了比原来更多的臭氧。有烃存在的情况下，当NO_x的浓度较低时，增加NO_x的浓度会提高臭氧的浓度。但是当NO_x的浓度高过某一点后，反应会产生变化，臭氧的浓度会下降。进一步增加NO_x的浓度会降低臭氧浓度。这可能是因为NO比O_2更容易与氧发生反应。

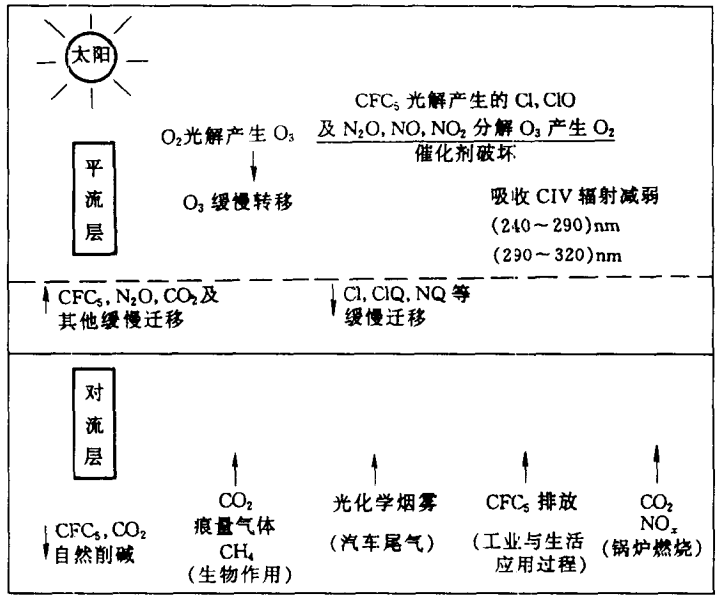


图 1-9　影响臭氧浓度的物理化学过程

早在1950年前，人们就开始注意臭氧对植物造成的损害。损害产生在叶子上，它会减弱植物的光合作用能力。在美国，臭氧被认为比其它空气污染造成了更多的农作物减产。

近年来，燃烧过程中氧化亚氮(N_2O) 的排放引起了较大的重视，这是由于它对大气环境的破坏作用为人们越来越了解。其一，它能破坏大气同温层的臭氧层；其二，它是一种温室效应气体。由于 N_2O 能通过生命过程永久产生，它是大气中含量居第二的含氮物质。N_2O 在对流层相当稳定(存活期达 150 年以上)，因此不能像 NO_x 那样由降雨返回地面，形成对流层的氮循环。N_2O 对人体没有很大危害，也不伤害作物， 它的主要问题在于对环境的直接作用而间接影响到地球上的生命活动。

1. 大气中的 N_2O

较新的测试表明，大气中的 N_2O 浓度已达 310ppb (1ppb=10^{-9}mole fraction)，而且在过去的几十年中其浓度逐步上升。图 1-10 所示即为 1977 年到 1989 年大气中 N_2O 浓度的变化。1990 年大气中 N_2O 平均浓度为 310ppb，换算为全部大气中的氮则相应为 1500TgN (1TgN=10^{12}gN)。由图可以看出，N_2O 浓度以每年 0.2%~0.3%的速度增加(相应为 3~4TgN/a，

或者 1ppb/a）。当考虑到臭氧层的消耗和全球能量平衡变化时，这种增长显然影响非常重大。地球上不同地方的 N_2O浓度略有差别，北半球比南半球高约 1ppb。

通过对南极冰中封存的气泡进行分析， 1800 年 N_2O 浓度为 285ppb，此前数千年其浓度变化很小。而工业化开始之后（1800 年后),其浓度有较大幅度的升高,如图 1-11 所示。因而可以认为，N_2O 浓度的升高是由于人类活动的加剧造成的。大气中 N_2O 浓度的升高使得温室效应及臭氧层的变薄加剧。

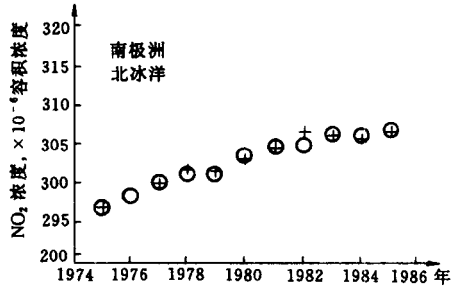


图 1-10 1975年～1985 年间大气中 N_2O 容积浓度变化

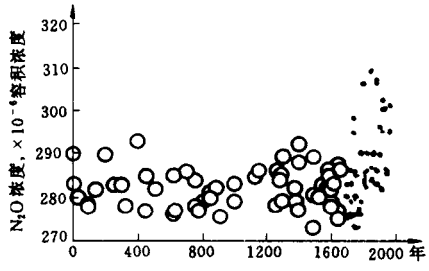


图 1-11 过去 2000 年来大气中 N_2O 容积浓度变化

2. 臭氧层破坏

从大气平流层臭氧层的生成与消减机理的表 1-3 可知，臭氧可通过四种途径来减少：①紫外光照射下的分解反应；②氯元素与其反应；③NO 与其反应；④OH 及 HO_2 与 O_3 的反应。其中，70%的 O_3通过第三种途径即与 NO 的反应而消减。平流层中 NO 的相当一部分是通过对流层后的 N_2O 由以下反应获得的：

表 1-3 平流层臭氧生成与分解的机理

生成机理		注释
O_2（hv）→O+O	(1-1)	Chapman 反应
$O_2+O+M \rightarrow O_3+M$	(1-2)	
O_3（hv）→O_2+O	(1-3)	
$O_3+O \rightarrow O_2+O_2$	(1-4)	
分解机理		来源
$Cl+O_3 \rightarrow ClO+O_2$	(1-5)	CFM→Cl
$ClO+O \rightarrow Cl+O_2$	(1-6)	→ClO
$NO+O_3 \rightarrow NO_2+O_2$	(1-7)	NO_2→O→2NO
$NO_2+O \rightarrow NO+O_2$	(1-8)	（hv）→N_2
NO_2（hv）→NO+O	(1-9)	
$OH+O_3 \rightarrow HO_2+O_2$	(1-10)	CH_4→OH
$HO_2+O_3 \rightarrow OH+2O_2$	(1-11)	

$$O_3+h\nu\ (\lambda<310nm) \rightarrow O(^1D)+O_2 \qquad (1\text{-}12)$$

$$O(^1D)+N_2O \rightarrow 2NO \qquad (1\text{-}13)$$

显然，平流层中 N_2O 浓度的增加将引起臭氧层中 NO 浓度增加，从而使臭氧层变薄加速。

3. 大气中 N_2O 的来源

大气中 N_2O 浓度是 N_2O 生成与分解之间平衡的结果。大气中 N_2O 主要以反应式(1-13)

及以下反应而分解：

$$N_2O + O(^1D) \rightarrow N_2 + O \quad (1\text{-}14)$$

$$N_2O + h\nu(\lambda < 314nm) \rightarrow N_2 + O(^1D) \quad (1\text{-}15)$$

每年分解约 10.5±3.0TgN，而大气中 N_2O 每年增加 3.5±0.5TgN[16]。由此可以推断每年 N_2O 产生量应为约 14±3.5TgN。

表 1-4 所示为 N_2O 产生源的估计。可以看出，土地，无论是自然的、未施肥的还是施肥的土地，都是 N_2O 的重要来源，化石燃料的燃烧以前测量为第二大源，然而，自从发现同时含有 SO_2、NO_x 和水的烟气能在储存过程中产生额外的 N_2O 后[1]，化石燃料的燃烧实际产生的 N_2O 量只有以前测量的十分之一。尽管如此，化石燃料的燃烧仍然是 N_2O 的重要来源之一。由于化石燃料的燃烧和生物焚烧产生的 N_2O 量被修改了，大气中 N_2O 的生成与分解量不再平衡，这可能有两种原因，一是还存在未知的源，再就是低估了目前已发现源的产生量。大气中 N_2O 的新的产生源正在探寻之中。

表 1-4 大气中 N_2O 来源的估计

来　源	排放值(TgN/a)
自然土壤排放	3.7
热带森林	
转变为草原的热带森林	0.8~1.3
温带森林	0.01~1.5
化石燃料的燃烧	3.2 (0.1~0.3)*
海洋	1.4~2.6
生物焚烧	1.6 (0.1~1.0)*
施肥的农业土壤	0.01~1.1
漏入地下水的化肥	0.5~1.1
总量	11.22~16.10 (6.6~12.6)*

* 修改后的值

1-2-4 燃烧粉尘与碳氢化合物的排放

煤粉经快速加热后有塑性，且膨胀，释出挥发分，形成中空的蜂窝状焦炭球粒。当焦炭烧掉 75%时，灰分杂质烧熔在一起；当烧掉 90%时，含有灰分杂质的脆骨炭结构破裂，生成的碎片数决定煤粒形成的大灰粒数。

固体燃料中含有的灰分，在燃烧过程中，一部分变成炉渣，一部分以飞灰的形式排入大气。以煤粉炉为例，大约有 10%~15%的灰落入到冷灰斗和尾部烟道中，而另 85%~90%的灰分则以飞灰的形式排入大气。表 1-5 给出了几种燃煤锅炉的粉尘特性。由于煤种不同，锅炉排烟中的粉尘浓度变化也较大。当燃用高灰分劣质煤时，粉尘浓度要比燃用低灰分优质煤高得多。例如当燃用发热量为 28600kJ/kg、灰分为 10%的优质煤时，排烟中粉尘浓度为 9.35 g/m^3 左右；而当燃用发热量为 14470kJ/kg、灰分为 47.5%的劣质煤时，其粉尘浓度高达 83.2g/m^3。

粉尘的另一重要特性是粉尘的粒度分布，它与燃烧方式和锅炉结构型式有关，如表所示。煤粉燃烧所生成粉尘的粒度为 0.1~100 μm，平均粒径为 10~39 μm。粒径小于 10 μm 的粉尘占总量的 20%~40%；粒度小于 44 μm 的粉尘占 70%~80%。另外，锅炉排烟中的粉尘

粒度和浓度与燃烧方式、磨煤机和分离器的型式以及煤种有关。其中影响最大的是煤粉细度。煤粉愈细，所生成的粉尘的粒度也愈小。

表 1-5　几种燃煤锅炉的粉尘特性

炉　型	烟气中的含尘浓度(g/Nm^3)	飞灰占总灰分的比例(%)	粒径小于 10μm 的含量(%)
手烧炉(自然引风)	0.6~2	15~20	5
手烧炉(机械引风)	1.5~5	15~20	5
往复炉排炉	0.5~2	15~20	
链条炉	2~5	15~20	7
振动炉排炉	3~8	15~20	
抛煤机炉	5~13	20~40	11
煤粉炉	10~30	70~85	25
沸腾炉	20~60	40~60	4

目前，静电除尘器和先进的具有四氟乙烯涂层的玻璃纤维滤尘元件的除尘器的除尘效率很高，可以达到 99.9%。因此，解决粉尘对大气的污染问题，已有相当成熟、可靠的技术。即使是高比电阻的粉尘，只要采用脉冲电源供电的静电除尘器，也比较容易解决[26]。

燃烧除了向环境排放大量的硫氧化物、氮氧化物、二氧化碳、粉尘等有害物质外，还向大气空间排放包括烷烃、烯烃和芳烃在内的碳氢有机化合物，其中以芳烃及其稠环化合物—多环芳烃影响最大。苯是芳香烃中最基本的化合物，在煤、石油和天然气燃烧排出的废气中，均含有苯及其同系物（如甲苯、二甲苯、三甲苯）。苯与其同系物比较，苯的毒性高，它们都对人体的心血管系统和神经系统有明显的影响。另外，燃烧产物中还含有芘、蒽等多环芳烃，多为强致癌物质，尤其是苯并(a)芘毒性最强。燃烧 1kg 燃料产生苯并(a)芘的数量见表 1-6，由表可见，同 NO_x一样，燃烧任何燃料都会产生苯并（a)芘，其中又以烧煤的生成量最大。全球每年向大气排放的苯并（a)芘约 5044t，这些污染物对环境的危害很大。

表 1-6　燃烧 1kg 燃料产生苯并 (a)芘的量

燃料	煤	木材	原油	汽油
产生苯并(a)芘的量（mg）	67~136	62~125	40~68	12~60.4

含氮有机化合物也是有毒污染物质，如过氧乙醛基，其刺激性很强；氰化物有极大的毒性；联苯胺是致癌物质。它们大多数是从燃烧和工业生产过程中排出，部分是由污染物在光化学作用下生成的，如 PAN。

在燃烧排出的废气中含有硫的有机化合物，如硫醇等，气味很臭，有很强的刺激性。

1-3　温 室 效 应

首先应澄清地球变暖是由于能源大量使用所释放的热量所造成的这种误解。人类一年使用的全部能源换算成石油是 80 亿 t左右，1kg石油相当于 1 万 kcal 热量，全部能源相当于 8×10^{16}kcal 或 33×10^{16}kJ。但是如果用这些热量加热全部海洋，一年也只不过能使其提高 6×10^{-5}℃，一万年也上升不了 1℃。使用能源一天所放出热量略小于 0.1×10^{16}kJ，而整个地球一天从太阳获得的热量就达 1500×10^{16}kJ。因此人类活动释放出的热能在其万分之一以下。地表每天白天被加热，太阳一下山就急剧的冷却下去，每年 365 天往复。这时的温度

变化万分之一其能量都是非常之大的。季节变化更是如此。

因此严格来讲，地球只从太阳获得热量。

太阳射向地球的光约 1/3 被云层、冰粒和空气分子反射回去；约 25%穿过大气层时暂时被大气吸收起到增温作用，但以后又返回到太空； 5%是由地面反射出去，特别是被冰雪所反射；其余的大约 37%则被地球表面吸收。这些被吸收的太阳辐射能大部分在晚间又重新发射到天空。如果地球表面发射的能量没有直接逃出大气层，就说明温室气体产生了作用。温室气体层能捕捉约 90% 的外逸热辐射，并能很长时间的保留住这部分热量。这样，我们这颗行星的温度才能保持在舒适的平衡状态下。

太阳表面温度约为 6000K，辐射的最强波段为可见光部分，地球表面温度为 288K，地表辐射波段为红外部分。从太阳这样的高温物体发射出来时是紫外线、可见光这样短波长的光，一般将其称为太阳波辐射或短波辐射；被地球吸收、变成低温后向宇宙空间发射的光是红外线这样的波长较长的光，常被称红外辐射或长波辐射。大部分太阳短波辐射可以通过大气层到达地面，使地球表面温度升高，与此同时，大气能强烈地吸收地面放出的长波辐射，仅散失少量热辐射到宇宙空间去。由于大气吸收热量多，散失少，使地球气温升高，形成了大气的“温室效应”随着气温的升高和地面长波辐射的增强，散失到宇宙空间的热量也随之增多。最终，地球接受到的太阳辐射热量和地球散失的长波辐射热量会达到平衡，形成地球上的平衡温度，即目前地球的平均气温。

能量的辐射是按物体绝对温度的四次方规律进行的。地球释放的热量若增加万分之一，其表面的绝对温度则需升高四万分之一。现在，地球的的平均温度为略小于 300K，地球温度的上升只不过为 0.01K 左右，不到温室效应气体影响的 1%。这里若用斯蒂芬·波尔兹曼公式进行计算，地球温度应为 $-18^{\circ}C$。但是，实际地表的平均温度为 15℃左右，这就是温室效应的结果。如果没有温室效应气体，地球上的生物就不可能生存。

若温室效应气体增加，地表气温会上升多少呢？这里有三点值得注意：一是从外空看地球，作为整体的地球，其温度为 -18℃不会变；二是即使温室效应气体增加，地表温度也不会持续上升。对应温室效应气体的浓度，在某点温度恒定，这时称为稳定状态，此时地表从太阳得到的热量又被全部传到较冷的外大气，最终传到宇宙，这样就可以知道此时的地表温度；三是温室效应气体阻碍了从温暖的地表到较冷的大气层外部的热量传递。若不考虑 CO_2 浓度增加造成的效应，要想传递与以前相同的从太阳接受的热量，地表和大气层外的温度差应增大，即表明地球变暖。根据计算，此时地表附近，即对流层变暖，但其外侧，即平流层比现在的气温要下降。

其示意图如图 1-12 所示。温室效应气体并不是使热量滞留在地表，而应考虑成热量不滞留地使地表变暖。

温室效应气体的作用是复杂的，不能仅借助于单纯的计算。因此，政府间气候变化工作组（ IPCC）提出了各种各样的估算值。如图 1-13 所示，若 CO_2 浓度增加一倍，则可计算出温度会上升 1.5~4.5℃。这个数值幅度差值较大，是因为在估算上还存在着一些困难，如果仅是温室效应气体的作用，那么推算并不难。但随着气温的升高，大气中的水蒸气浓度将增加，水蒸气是温室效应气体，但同时也会形成云，还遮挡太阳光线而起了冷却地表

的作用，两方面作用哪方面强，现在还不很确定。

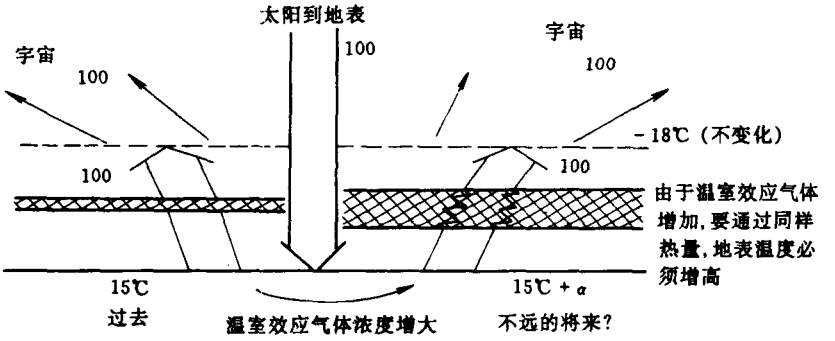


图 1-12　地球变暖和温室效应的原理

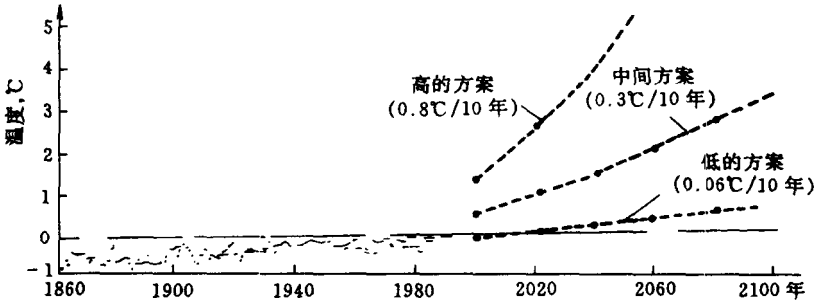


图 1-13　平均地表气温变化几种趋势

温室效应是因气体有选择地吸收一定波长的光谱而产生的。图 1-14 给出了地球发射的长波光谱，可以看出，地球辐射的部分光谱已经被温室效应气体吸收。各种气体在大气中的寿命也不相同，影响作用也有差异，都可折算成 CO_2 浓度。

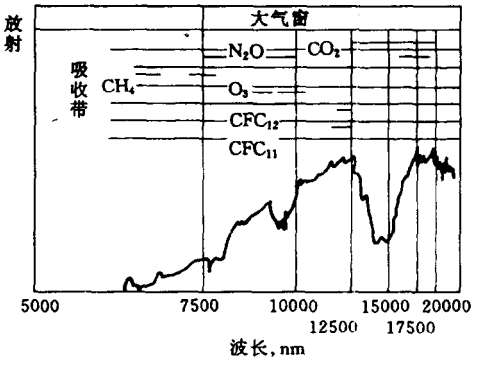


图 1-14　温室气体的吸收带

由图 1-15 可知，CO_2 吸收带在波长 12500~13000nm 处，正是在这一谱段地球射出的长波受到很大削弱。而在波长为 7500~13000nm 波辐射被削减较少，有 70%~90%的地球长波辐射是从这个波段散失到宇宙空间去的。这一谱段也常被称为“大气窗”。在这一谱段中有 N_2O、CH_4、O_3 和氟里昂等微量气体的吸收带。一旦这些微量气体大量增多。在 7500~13000nm 谱段的地球长波辐射也将大量吸收，即地球赖以散失辐射热量的大气窗被关闭，温室效应就会加剧。

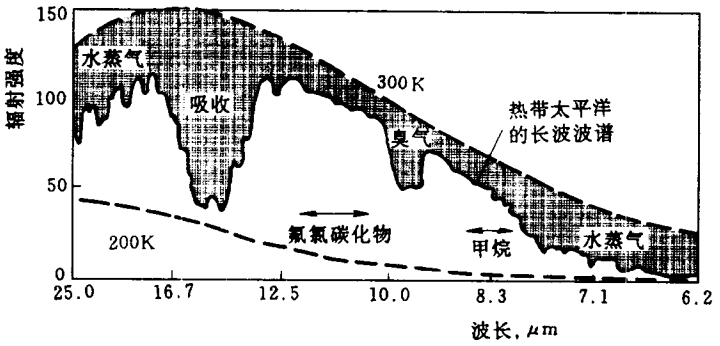


图 1-15　地球的长波波谱（实线）以及 300K（27℃）和 200K（-73℃）的黑体辐射波谱（虚线）

图 1-16 的横轴表示以千年为单位从现在回溯的年代。在十几万年的年代中如图所述的那样，的确 CO_2 浓度和气温具有非常好的相关性。

温室效应一词，形象地借用了人们利用花房温室繁殖花卉、种植农作物的经验。在温室顶棚，覆盖着透明的玻璃或薄膜。太阳光可以透入温室，升高温室内部温度。

在大气温室效应的作用下，地表面具有适于各种生物生存的温度。现在的全球地表年平均温度是 15℃. 经典的辐射研究表明，在假定全球平均反射率 30％的情况下，如果没有大气，地表温度将比现在低 33℃左右，只有－18℃。由此可见温室气体对于全球温度的重要性。

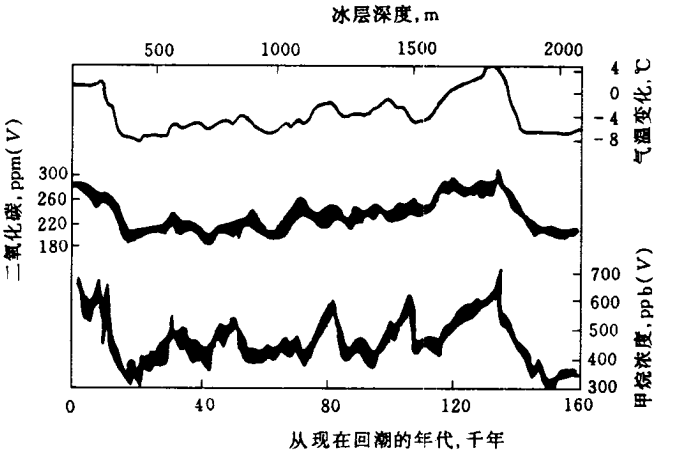


图 1-16　过去十几万年间南极的气温、二氧化碳、甲烷浓度变化

人类有关活动对温室效应有着重大影响，如图 1-17 所示。

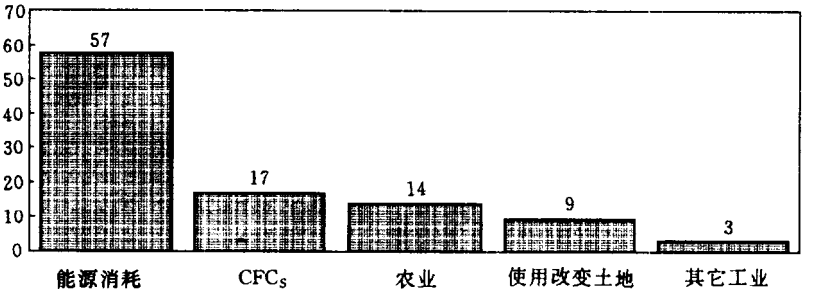


图 1-17　人类活动对温室效应增加的影响