

# 温室气体与气候变迁

## ——兼论科学不确定性

毛文永

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)

摘 要

X16

大气CO<sub>2</sub>和其他温室气体的增加可能导致的全球气温上升日益引起世界的普遍关注。缔结控制气候变化的国际公约的压力正迅速升级。本文阐述了有关二氧化碳的源与汇、效应和影响等方面的不同观点, 展示了其他温室气体作用机理方面的认识难点, 评述了目前提出的对策、建议, 提出温室气体与气候变迁科学研究上的不确定性(Uncertainty)妨碍国际环境保护政策决策的有效进行和解决这一问题的必要性。

**关键词:** 温室效应, 气候变化, 对策, 不确定性。

大气中CO<sub>2</sub>浓度上升以及随之而来的全球气候变暖问题, 是世界环境科学研究的热点, 并已成为国际经济和政治斗争的新领域。这一问题将是1992年在巴西召开的“联合国环境与发展大会”的中心议题, 为此而采取的国际缔约行动, 将深刻地影响世界各国特别是发展中国家的经济和社会发展。围绕全球气候变化开展的科学研究、政策研究以及国际环境与经济合作努力, 正在铺设一条从科学走向政策决策的道路, 但科学上的不确定性(Uncertainty)阻碍着达成国际共识和采取协调行动的努力。

### 一、CO<sub>2</sub>的温室效应

大气二氧化碳能透过阳光的短波辐射, 又能吸收地球表面散射出来的长波辐射, 从而使地球温度象温室内的温度一样升高, 即产生“温室效应”。

温室效应的真实性可能是无可置疑的, 因为没有这种作用, 地球会比现在冷大约38℃, 整个地球也将为冰雪所覆盖<sup>[1]</sup>。

然而, 地球并不是一个简单的温室, 而是一个无比巨大的体系, 存在错综复杂的影响因素, 因而要确定温室效应的真实性和影响程度是十分困难的, 由此也造成CO<sub>2</sub>的温室效应与地球气候变化科学研究上的不确定性。

#### 1. CO<sub>2</sub>的源与汇

在探寻大气CO<sub>2</sub>不断增加的原因时, 首先注意到的是化石燃料的贡献。在1860—1910年间, CO<sub>2</sub>的排放量一直以每年4.22%的速度(约90Mt/a)稳定增长; 1950—1970年是另一个稳定增加期, 每年的增长率为4.44%。曾有人根据前一个增长期预测1985年的CO<sub>2</sub>排放水平将达到16Gt碳/a, 但实际情况远非如此<sup>[3]</sup>。

本文于1991年1月12日收到。

目前认为, 大气中CO<sub>2</sub>的增加主要是人类活动造成的。热带土地利用方式改变导致的森林减少, 估计每年释放约1656Mt碳, 温带和寒带土地利用改变释放约133Mt碳/a, 燃烧化石燃料释放的CO<sub>2</sub>随人类活动加剧而增加, 1950年为1639Mt碳, 1986年达到5555Mt碳<sup>[4]</sup>。要预测未来的释放量是十分困难的, 一般倾向性认为, 到2050年, 全球每年的CO<sub>2</sub>释放量可能在2—20Gt碳之间(差距达10倍!), 并且最有可能在10Gt碳左右<sup>[3]</sup>。

大气中CO<sub>2</sub>浓度的变化是其全部源的增加率减去全部汇的吸收率的最终结果。主要的CO<sub>2</sub>发生源是化石燃料燃烧、森林减少、植物呼吸、土壤中含碳物质的分解以及海洋释放等; 主要的吸收汇是光合作用、海洋吸收以及有机碳的沉积埋藏等。在估算这些源和汇的输出输入量及各自的贡献率时, 存在着很大的差异。

Goreau认为, CO<sub>2</sub>的稳定与否首要的是一个生物学问题, 而不是技术的或地球物理学问题, 因为大宗的碳流动是通过生物过程进行的。他估算的陆地植物光合作用固定的碳达120Gt/a。这比Yukio Sugimura提供的数据大近1倍(表1)。

其他研究者也做过这类估算, 但除了化石燃料燃烧的排碳量比较确实外, 其他碳流动方式皆因测量不充分或其他研究不足而难以准确估量和比较。

表1 CO<sub>2</sub>的源与汇估值比较(Gt/a)<sup>[1,2]</sup>

Table 1 Estimated figure Comparison between Sources and Sinks of Global CO<sub>2</sub>

源 Sources	输入量 Input		汇 Sinks	输出量 Output	
	Goreau	Yukio		Goreau	Yukio
陆地植物呼吸 Respiration of land plant	60	65	陆地光合作用 Photosynthesis in land	120	65
海洋释放 Ocean release	98	78	海洋吸收 Ocean absorption	100	78
土壤中的分解 Decomposition in soil	60		海洋光合作用 Photosynthesis in ocean		45
森林减少 Deforestation	1—2		海底堆积 Accumulation in sea bed	2—4	0.2
化石燃料燃烧 Fossil-fuel burning	5.5	5.5			

## 2. CO<sub>2</sub>增加的效应

(1) 气候变化 CO<sub>2</sub>增加引起的未来气候变化均是由各种模型进行预测的, 并以CO<sub>2</sub>浓度增加1倍为预测目标。几乎所有不考虑反馈机制的模型都指出, 如果CO<sub>2</sub>水平提高1倍, 地球气温将上升1.2—1.3°C; 当引进反馈机制后, 大多处于1.5—4.5°C范围内<sup>[3]</sup>。

目前这类预测结果在很大程度上取决于如何数学地表达云的作用。现有模型大多假定, 云通过吸收热量而加强温室效应; 但最近的卫星直接测量表明, 云量增加因把更多的太阳光反射到宇宙空间而减少气候的变化<sup>[11]</sup>。

有人根据南极冰核记录的CO<sub>2</sub>与温度的相关关系, 取每1万年的CO<sub>2</sub>浓度与温度数值得到线性的回归:

$$\text{南极温度变化(}^\circ\text{C)} = -26.5 + 0.094 \times \text{CO}_2 \text{(ppm)}$$

$$R = 0.86 \quad s.e = 1.7^\circ\text{C}$$

并认为这一关系可以解释约3/4的温度-CO<sub>2</sub>变化。也就是说, CO<sub>2</sub>每上升1ppm, 气温

就增加 $0.094^{\circ}\text{C}$ 。据此外推,若 $\text{CO}_2$ 浓度增加1倍,预计最终会使温度上升 $32.9^{\circ}\text{C}$ ,这比气候模型预测的高7倍。显然温度与 $\text{CO}_2$ 的关系不是简单的线性关系,因为 $\text{CO}_2$ 在高浓度时只吸收很少的热量,而且还有许多其他因素的影响<sup>[1]</sup>。

现在已知有几种正反馈作用影响温室效应的最终效果,如海水温度上升使 $\text{CO}_2$ 溶解度减少,气温上升增加蒸发和湿度以及随着冰盖融化减少反射能力。有人认为,这些地球物理反馈作用可能不及生物代谢作用引起的生物地球化学反馈作用。植物和藻类的呼吸随温度上升得比光合作用的增加更快,细菌和真菌的代谢也将剧烈增加,引起植物净生产的下降和枯枝败叶、土壤及沉积物中的碳分解的增强,而且由于分解的增加,使贮存于极地苔原沼泽中的碳减少<sup>[1]</sup>。这些都是主要的碳贮库(表2),它们的削弱无疑将大大加剧碳释放,从而加强温室效应。

此外,温室效应引起的气候变化在全球是不均匀的,高纬度地区强,低纬度地区弱,同纬度不同地区亦不一致。例如近百年来,我国气温以40年代最暖,以后变冷变旱;50年代以来,东北、西北西部和华北变暖变旱,而秦淮以南、青藏高原以东地区,尤其是四川盆地、汉中盆地、云南北部、贵州和东南沿海均在变冷。这种变化的不确定性,说明温室效应是一个十分复杂的问题,并不像理论描述的那么简单。

(2) 海平面上升 气温上升导致海平面增高以及由此导致的经济、社会和生态问题,是又一个普遍关注的热点。13万年前,地球的气温比现在约高 $2-3^{\circ}\text{C}$ ,海平面也比现在高6m,因而一旦大气、海洋和生物圈在新的较高温度下达到平衡,未来的变化也可能象那个时期一样地大<sup>[1]</sup>。例如,占陆地冰90%的南极冰盖,即使只融化1%,就会使海平面上升 $0.8\text{m}^{[3]}$ 。

然而一些气候模型认为,全球变暖的一个可能结果是增加南极冰的体积而不是使其减少,因为南极地区的降水量将随温度上升而增加,导致更高的降雪量。因此,如果气温增加 $3^{\circ}\text{C}$ ,且南极降水量增加24%,则南极冰体积最终会增加近1%,导致海平面下降 $50\text{cm}^{[3]}$ 。

另一种对海平面上升的解释是,随着地球被加热,海平面上升不是由陆地冰或冰川融化造成,而是海洋变热时发生的膨胀,并估计全球增暖 $1.5-5.5^{\circ}\text{C}$ 将引起海面升高 $20-165\text{cm}^{[3]}$ 。

尽管对极冰融化或海水热膨胀进行了广泛讨论,然而对海平面上升的估计仍各不相同。例如美国科学研究委员会(NRC)估计到下个世纪中期海平面可能上升70cm;另一项研究则估计到2100年海平面可能上升144—217cm;还有人假定,如果极冰融化,有可能使海平面升高 $5-6\text{m}^{[6]}$ 。这种估算值的差异作为科学讨论似乎无足轻重,但当将这些科学结论应

表2 地球主要碳贮库  
Table 2 The main Storages of Global Carbon

碳 贮 库 Carbon storages	贮 存 量 amount(Gt.C)
大气: $\text{CO}_2$ (1985年345ppm) Atmosphere: $\text{CO}_2$ (345ppm, 1985)	732
海洋: 无机碳(全碳酸盐) Marine: Inorganic C(all carbonates)	37400
溶解的含碳气体化合物 Resolved gas compounds	2700
海洋生物 Marine biomass	3
陆地生物圈: 陆上动植物 Land biosphere: Animal and plant	560
土壤及腐殖质 Soil and humic matter	1500
地下水 Underground water	450
堆积物: 无机碳 Deposits: inorganic C	约60 000 000
有机碳 Organic C	约12 000 000
化石燃料 Fossil fuel	约 5500

用于定量的政策行动时, 其不确定性就显得特别重要了。

(3) 生态系统变化 人们对生态系统的了解还十分有限, 要预测气候变迁导致的生态变化, 其不确定性可能更大。例如, 对降雨量的增减和地区分配的不均衡性, 森林推移, 物种优势变化, 某些物种的灭绝, 对农作物的影响等, 目前还仅仅是根据一些模型进行初步的推测。

有人认为,  $\text{CO}_2$  的存在有利于植物增加其碳水化合物水平。如果  $\text{CO}_2$  水平提高 1 倍, 有可能使很多农作物的产量和杂草生长增加 1/3, 并且实验地证实,  $\text{C}_3$  植物对增加  $\text{CO}_2$  的响应比  $\text{C}_4$  植物显著得多,  $\text{CO}_2$  浓度增加 1 倍, 可使  $\text{C}_3$  植物的生长和产量增加 10%—50%, 而  $\text{C}_4$  植物只增长约 0%—10%<sup>[8]</sup>。但否定的观点则认为, 这种状况在高度施肥的温室中可能是真实的, 但自然界的植物生长主要是受肥料的限制, 而不是缺少  $\text{CO}_2$ , 因而增加  $\text{CO}_2$  不可能促进植物生长<sup>[11]</sup>。

## 二、其他温室气体及作用机理

科学研究的另一个注意点是寻找  $\text{CO}_2$  以外的其他温室气体并确定他们各自的贡献。目前已知的这类物质主要有甲烷、CFCs 和一氧化二氮等(表 3)。

北半球近 50 年来, 甲烷浓度从 0.7ppm 上升到 1.7ppm, 现在每年的平均释放量约为 425Mt, 其中约 375Mt 被氧化或其他过程破坏, 其余 50Mt 存留于大气中, 一氧化二氮由自然源(土壤等)和人工源(施肥、燃烧等)产生, 估计到 2030 年可上升到 0.375ppm, 目前对其发生、迁移和归宿等还了解甚少;<sup>[8]</sup> CFCs 既是臭氧层破坏物质, 也是温室气体, 它在 7.8 $\mu\text{m}$  的红外范围内有强吸收带。这些痕量气体的作用是不可低估的, 与同浓度的  $\text{CO}_2$  相比, 甲烷的温室效应能力为其 40 倍,  $\text{N}_2\text{O}$  为其 100 倍,  $\text{O}_3$  为其 1000 倍, 而氟利昂为其 10000 倍。<sup>[7]</sup>

为探索各种温室气体的作用机理而进行的大量精细的化学实验表明,  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  等气体的共同的直接加热效应在不久的将来也许会达到与  $\text{CO}_2$  不相上下的程度, 而且许多这类气体还通过它们之间以及它们与大气其他组分的相互化学反应而有重要的间接贡献。

例如, 在对流层,  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{NO}_x$  可以增加臭氧的浓度, 而臭氧是一种重要的活性气体, 会导致其他一系列变化。臭氧本身就是温室气体, 它可吸收波长大于 200nm 的紫外光, 也能吸收红外辐射, 其影响随高度和纬度而变化。<sup>[8]</sup>

$\text{OH}$  虽不是直接的温室气体, 但它是大气中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ 、 $\text{CH}_3\text{Cl}$ 、 $\text{CH}_3\text{Br}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{DMS}$ (二甲硫)以及其他烃类和含氢卤烃的主要清除剂。 $\text{OH}$  与其他  $\text{OH}_x$  通过将  $\text{NO}$  氧化成  $\text{NO}_2$  而去除活性的  $\text{NO}_x$ , 从而对对流层臭氧的形成起核心影响作用。若大气中  $\text{CO}$  和  $\text{CH}_4$  等大量增加, 将使  $\text{OH}$  减少, 于是增强这些痕量气体的正反馈作用。但是, 另一方

表 3 大气中温室气体<sup>[3]</sup>  
Table 3 Greenhouse gases in the Atmosphere

温室气体 Greenhouse gases	大气中浓度 Concentration in the atmosphere (ppb)	年增长率 Annual growth rate (%)
二氧化碳( $\text{CO}_2$ )	350	0.4
甲烷( $\text{CH}_4$ )	1650	1.0
一氧化二氮( $\text{N}_2\text{O}$ )	304	0.25
CFC-11	0.23	5.0
CFC-12	0.4	5.0
一氧化碳( $\text{CO}$ )	可变	0—2
四氯化碳( $\text{CCl}_4$ )	0.125	1.0
甲基氯( $\text{CH}_3\text{Cl}$ )	0.13	7.0
臭氧( $\text{O}_3$ )	可变	—

面, 对流层温度的上升将导致大气中 $H_2O$ 浓度的增加, 于是又增加OH; 另外,  $NO_x$ 和 $O_3$ 的增加因强化了将 $H_2O$ 转化为OH的反应而导致OH的增加。这些相互反应的净效应如何, 目前尚不得而知, 而且也未建立描述和综合这类作用的三维全球对流层化学模型, 因而全球性OH的浓度变化趋势仍在未知之列<sup>[8]</sup>。

在平流层, 目前的注意力主要集中在CFCs引起的臭氧层耗蚀上, 但高层大气组分的变化也同样影响地球的气温。研究表明, 随着高度增加, 水分子浓度亦增加, 在对流层上部达到6 ppm, 这是由于每破坏一个 $CH_4$ 分子就会增加两个 $H_2O$ 分子造成。水是红外辐射的主要吸收者, 并有计算指出, 因甲烷增加而产生的平流层水蒸气所增加的温室效应达到所加入甲烷作用的约30%<sup>[8]</sup>。

### 三、宏观观察与研究

全球或大范围的宏观观察与测量, 目的在于判定温室效应的真实性、影响程度与范围, 验证实验模拟的可靠性和各种理论、假说的正确性, 并寻求适当的控制措施。

WMO(世界气象组织)正在进行世界天气观察(WWW)、世界气候变化(WCP)、海面温度和大洋环流、海洋动力学模拟、大气与水的反应、温室气体监测等项目。

UNEP(联合国环境规划署)的使命包括土壤、气候、水、主要自然资源等许多方面, 许多研究都是与其他国际组织和国家组织协作进行的。例如, UNEP与UNESCO(联合国教科文组织)合作, 正在巴西亚马孙地区进行一项热带雨林与全球气候精确联系的研究, 目的在于测定亚马孙流域森林和裸地反射太阳光的差异以及云、风、裸地等导致的温度和湿度变化。亚马孙森林每 $hm^2$ 每天通过光合作用固定9 kg碳, 因而被认为对全球气候有极其重要的作用, 特别是把赤道的热量发散出去<sup>[10]</sup>。

此外, UNESCO进行的地球科学项目、IIASA进行的森林研究, WHO进行的空气监测等项目, 都是企图通过大范围和时间研究, 确定这些变化的幅度、范围以及影响对象和影响程度等。但是, 这类研究大多开始不久, 要精确判明地球气候等方面的变化趋势和复杂的影响和作用, “还得走很长的路”。<sup>[10]</sup>

### 四、科学家的对策建议

#### 1. 减少源排放

从温室气体的增加主要系化石燃料燃烧造成这一认识出发, 有人提出通过经济手段控制化石燃料的消费量, 具体办法是征收“碳税”或建立“化石燃料能源增长税”等<sup>[11]</sup>。但是, 这种办法无疑会限制发展中国家能源消费的增长和经济的发展, 因为在经济发展的初级阶段, 对能源消费的需求增长不仅是必要的, 而且是必然的。

寻求替代燃料, 已在积极进行, 但其主要目的不是减少 $CO_2$ 排放, 而是增加能源供给。尽管迄今已提出从太阳能到氢能等许多新能源, 并估测了其光辉的发展前景, 但在近期, 受技术和经济限制, 都不可能取代化石燃料。核能是目前唯一的能作为大规模的替代能源, 如法国电力的75%就是由核电站发出的<sup>[11]</sup>, 但核电也因费用、安全以及发展速度的限制, 不可能有足够的规模和速度来对2030年的温室效应问题产生重大影响<sup>[8]</sup>。

提高能源利用率可能是一项较合理的建议。自从1973年石油能源危机以来, 西方国家在

这方面已获得很大成功。1973—1986年间, OECD国家经济产出平均增长了32%, 而全部一次能源只增长5%。现在美国每年的一次能源需求量甚至低于1973年, 而其GDP(国内生产总值)却上升了40%; 日本GDP亦上升了46%, 而同期的能源需求却下降了6%<sup>[11]</sup>。当然节能和提高能源利用率是一项艰巨的任务, 发展中国家面临的技术和经济困难更多, 但这不仅是当前行之有效的措施, 也是一项具有长远意义的战略。

## 2. 增加吸收CO<sub>2</sub>的汇

从大宗的CO<sub>2</sub>循环主要通过植物进行以及大气CO<sub>2</sub>增加主要是由于森林减少(汇削弱)构成这一认识出发, 科学家们提出, 平衡大气CO<sub>2</sub>的最有效措施是森林再植, 即增加碳贮库, 并认为, 若再植的热带森林面积超过 $2-8 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 就能够去除全球大气积聚的碳, 而且其费用只有300—400美元/hm<sup>2</sup>, 相当于去除1t碳需3—4美元, 并且这样做还能带来林农业、水土保持、增加就业以及提高持续发展能力等许多效益。为此建议, 要将从发达国家征收的排碳费转移到进行森林再植的国家(主要是热带发展中国家)<sup>[11]</sup>。但不幸的是, 目前不仅植树速度很慢, 相反热带森林却以每年约 $1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的速度在减少, 因而亦有人认为, 大规模的营林是不现实的, 其作用是值得怀疑的, 甚至认为这种政策抉择停留在科学幻想小说的范畴。<sup>[8]</sup>

## 3. 技术对策

将CO<sub>2</sub>从发电厂的尾气中滤掉, 转化成可运输的含碳化合物, 然后倾埋于洋底。这类技术即使可能, 其费用也是不可承受的, 而且只控制大电厂只不过去除CO<sub>2</sub>排放量的一半, 无法控制分散源, 也不能解决全球CO<sub>2</sub>问题。<sup>[3]</sup>

## 4. 适应性原则

通过培育新作物品种等办法适应气候变化; 构筑海堤对抗海平面上升, 象荷兰人那样生活在海平面5m以下; 在不断发展中适应气候的变迁等。但亦有人认为, 这种无所作为付出的代价可能是更为巨大的。

## 参 考 文 献

- [1] Thomas J. Goreau, *AMBIO* 1990, 19(5): 230—236.
- [2] Yukio Sugimura, 南觉夫译, *世界环境* 1990, (2): 9—11.
- [3] 陈定茂编译, *国外环境信息* 1990, (1): 1—18.
- [4] 何小明摘译, *世界环境* 1990, (2): 8.
- [5] 安藤淳平, 王晶摘译, *国外环境信息* 1990, (1): 23.
- [6] P.L. Peters, 王伟译, *国外环境信息* 1990, (1): 30.
- [7] Motonori Tamaki, 姚铃铃译, *世界环境* 1990, (2): 12—16.
- [8] Donald J. Wuebbles, et al., 1989, *JAPCA*, 39(1): 22—26.
- [9] Alison clayson, *AMBIO* 1990, 19(5): 270—272.
- [10] Shane Cave, *Our Planet* 1990, 2(3): 8—9.
- [11] James Ruscoe, *UNEP Industry and Environment* 1990, (1): 25—26.

## GREENHOUSE GASES AND CLIMATE CHANGE UNCERTAINTIES IN SCIENCE

Mao Wen-Yong

(*Research Center for Eco-Environmental Sciences, Academia Sinica, 100085*)

Rising global temperature resulted from increasing carbon dioxide and other greenhouse gases in the atmosphere is causing an increasing worldwide concern and the pressure change is rapidly escalating. This paper reviewed various viewpoints in scientific researches on carbon dioxide with its sources and sinks, warning effects and impacts, etc, and showed different understanding of acting mechanisms of other greenhouse gases. The scientific uncertainties on greenhouse gases and climate change resulted in an obstacle to effective progress in international policy-making for global environment conservation, and the necessity to solve the problem of uncertainties have being become an urgent task to scientists. The conception of integration of environmental protection and economic development is highly appreciated.

**Key words:** carbon dioxide, greenhouse effect, climate change, policy-making.