

温室效应及其对气候影响 的最新研究

王绍武

(北京大学地球物理系)

提 要

本文介绍与温室效应有关的最新研究工作, 主要讨论温室气体及其对气候影响的估计、全球气候变暖、温室效应检测三方面的问题。文中强调了研究中的不确定性, 指出了迫切需要研究的问题。

目前人们对气候变化及其所造成的影响日益关心, 气候增暖将对农业等国民经济部门、水资源、生态环境乃至社会发展产生很大影响。温室效应一直被认为是人类活动影响气候、影响环境的一个重要方面, 愈来愈引起世界各国科学家和政府的兴趣和关注, 成为当前大气科学研究中的一个最重要的课题, 在世界气候计划(WCP)中占有主导地位。政府间气候变化专业委员会(IPCC)下设三个工作组, 专门解决与温室效应, 或者广义地说是与人类活动影响有关的问题, 从而使这一问题显得更加突出。

IPCC第一工作组(科学评价组)近期组织数10名专家撰写了一份对气候变化科学评价的报告, 准备提交于1990年10月在日内瓦召开的第二次世界气候大会。该报告详细地阐述了温室效应及其它有关问题的科学基础, 其中包括很多近期的和尚未发表的最新研究成果。本文拟根据此报告, 就其中几个中心问题介绍如下。

一、温室气体的增加

1. 大气中CO₂浓度的增加

CO₂的正式观测开始于1958年, 但从极冰气泡中的气体, 可以测得十几万年以来大气中CO₂浓度^[1]。分析表明, 近千年来CO₂

浓度相当稳定, 约变化于270—290ppmv之间。所以, 一般人们把工业化之前的CO₂浓度取为280ppmv。

1958年的观测值为315ppmv, 1990年估计为353ppmv, 相对于工业化之前已经增加了70ppmv以上, 约占工业化之前浓度的四分之一左右^[2]。

2. CO₂浓度增加的原因

大气中CO₂浓度增加的主要原因, 是砍伐森林及燃烧矿物燃料^[3]。工业化之前, 从19世纪中开始大量砍伐森林, 开垦荒地。由于单位面积未开发森林比农业用地含碳量大20—100倍, 因此砍伐森林向大气中排放大量碳, 燃烧矿物燃料(煤、石油及天然气)向大气排放碳的数量, 在二次世界大战之后呈指数形式增加。最迅速时排放量每年增加4%。目前由于砍伐森林每年排放到大气中的碳为 $1.9 \pm 1.1 \text{ Gt}$ (Gt为10亿吨), 燃烧化石燃料每年排放 $5.7 \pm 0.5 \text{ Gt}$ 碳, 合计每年排放 $7.6 \pm 1.6 \text{ Gt}$ 。每排放2.12Gt的碳约相当大气中CO₂增加1ppmv。但排放到大气中的碳仅有40%左右存留在大气中, 其余大部分被海洋吸收。所以, 目前大气中CO₂浓度的年增量为1.8ppmv。

怎样证明大气中CO₂浓度的增加是人类活动造成的呢? 有三点证据:

(i) 极冰气泡中 CO_2 浓度分析证明, 1.8万年前冰河极盛期, 大气中 CO_2 浓度只有 180—200 ppmv, 12万年前的间冰期为 300 ppmv, 这就是说目前 CO_2 浓度已超过了12万年来的最高值。(ii) 南北两个半球 CO_2 浓度差在1960年仅为 1 ppmv, 1985年已增加到 3 ppmv, 这显然是两个半球排放量不同造成的。(iii) 生物界与矿物燃料中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比值比大气中低, 因此, 人类活动所增加的 CO_2 使大气中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值降低, 目前已降低 1%。另外燃烧矿物燃料生成的 CO_2 中没有 ^{14}C , 因此, 燃烧矿物燃料使 CO_2 浓度增加, 但大气中 ^{14}C 浓度下降。树木年轮中 ^{14}C 分析表明已下降 2%。以上三点证明大气中 CO_2 浓度增加是人类活动造成的。

3. 何时大气中 CO_2 浓度加倍

过去人们研究温室效应时, 常用 CO_2 浓度加倍时气候变化作为标准。一般取 600 ppmv, 即对1900年前后的 300 ppmv 加倍, 但也有人严格取工业化前 280 ppmv 加倍, 即 560 ppmv, 来进行气候模拟。后来发现除 CO_2 外, 大气中其它温室气体如甲烷、一氧化二氮、特别是氯氟烃 (CFCs) 温室效应也很强, 甚至按分子计算一个 CFCs 分子的作用相当一个 CO_2 分子的一万多倍。所以一段时期内人们经常把其它温室气体的温室效应也折合为 CO_2 , 讨论整个温室气体相当 CO_2 浓度加倍的情况。但这也不很方便。所以在 IPCC 报告中对温室效应一律用加热率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 表示。用加热率而不用可能造成的温度变化表示, 还避免了气候模式的不确定性。

未来加热率的变化, 决定于温室气体的排放量。IPCC 设计了 4 种排放方案:

A 方案: 称为正常排放方案, 煤为主要燃料, 无限制地砍伐森林, 照常排放甲烷及一氧化二氮, 部分国家参加蒙特利尔议定书。

B 方案: 改用低碳燃料, 严格控制一氧

化碳, 禁止砍伐森林, 所有参加国都履行蒙特利尔议定书。

C 方案: 改用可更新能源, 下个世纪后半期用核能代替, 逐步淘汰 CFC, 并限制农业排放量。

D 方案: 改用可更新能源, 下个世纪前半期用核能代替, 到下个世纪中 CO_2 排放量减少到 1985 年的 50%。

下面给出工业化前 (取作 1765 年) 到 2000 年、2050 年及 2100 年各种方案所得到的加热率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$):

方案	1765—2000	1765—2050	1765—2100
A	3.22	6.90	10.48
B	3.00	5.40	6.77
C	2.98	4.67	5.23
D	2.96	4.11	4.31

一般认为, 大气中 CO_2 浓度加倍所造成的加热率为 $4 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 因此, 看来无论如何到下一个世纪中之前, 大气中各种温室气体的总温室效应已相当 CO_2 浓度加倍⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

4. 对温室效应的估计

近 10 几年来, 人们一直用各种气候模式估计大气中 CO_2 加倍后的气候变化。到目前为止, 一般公认大气环流模式是最好的工具。80 年代以来, 人们普遍接受 CO_2 加倍时, 地球表面气温上升 $1.5—4.5^\circ\text{C}$, 或者 $3.0 \pm 1.5^\circ\text{C}$ ⁽⁷⁾。但是最近的模拟结果表明升温在 $3.5—4.0^\circ\text{C}$ 之间, 接近过去估计的上限。同时, 也逐渐认识到这个估计有非常大的不确定性。例如英国气象局的模式, 只是改变了对冰云与水云的描述, CO_2 加倍时的增温就从 5.2°C 下降到 1.9°C 。海洋则是一个更大的不确定性的根源。在目前的大气环流模式中, 仅考虑了 50—60m 深的浅层海水。初步研究表明, 海洋对温室效应的延缓作用可能达 50 年 (GFDL 模式) 或甚至 75—100 年 (OSU 模式)。因此, 可能实现的变暖要大大低于平衡模式所得到的结果⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

据 IPCC 报告估计, 按 A 方案, 下个

世纪可能每10年平均增温 0.3°C ($0.2-0.5^{\circ}\text{C}$ 之间)。这样到2025年气温比现在上升 1°C 、到2100年上升 3°C 。但按B、C、D方案,则10年平均增温可能只有 0.2°C , $0.1-0.2^{\circ}\text{C}$ 及 0.1°C 。

二、全球气候变暖

1. 全球平均气温序列

大气中 CO_2 至今比工业化前已增加了四分之一左右,其它温室气体也有明显增长。应该已经造成了相应的气候变暖。因此,近百年来的气候变化可以成为温室效应理论的试金石。由于温室效应是全球性的,所以,要用全球平均气温来进行检验。然而,建立一个对全球或半球有代表性的气温序列是非常困难的。主要困难来自三个方面:(i)资料覆盖面问题,(ii)城市热岛效应,(iii)观测技术的改变。自1961年Mitchell第一次建立了近百年比较可靠的全球及半球平均气温序列以来,有30多位作者在这方面进行了研究。现在看来比较好的序列有三个:

(1) 苏联地球物理现象总台维尼柯夫等^[10],从70年代就绘制出版了北半球月平均气温距平图,手绘等距平线,对经纬度格点值读数,再按纬圈平均、加权求北半球平均。过去这份资料由于各单站求距平时,所用的平均时间不一致,因此受到批评。1987年又重新统一计算了距平,并用最优插值法内插经纬度格点值,并把序列向前推到1841年,成为至今最长的观测序列。但可惜只是北半球平均。

(2) 英国东安吉利亚大学气候研究中心的琼斯等^[11],在80年代建立了可能包括资料最完全的全球及半球平均气温序列。大约用2000个陆地测站的1亿个数据及6千万个海洋观测数据。并注意尽力排除城市热岛效应及观测方法改变带来的误差。计算方法是先插补格点值,然后按纬圈面积加权,求半球及全球平均。这个序列最大的缺点是早期资

料覆盖面不全。因为,虽有海上记录,但受航线影响,大部分海上,特别是大洋中部及南半球仍是空白。所以,至今仍有一些人认为这个序列主要反映的还是陆地上的气温变化。

(3) 美国宇航局(NASA)的汉森等^{[12][13]},近几年用不同的方法建立了全球的气温序列。他们把全球分为面积相等的80个区。每个区再分为100个副区,取距每个副区中心1200km以内的站,按记录长短排列。然后,以距中心距离为权重,逐个合并求平均,得到每个副区的平均,再按副区的面积大小加权求区平均。对区加权求纬圈平均,权重为每个区有记录的副区数。

这三个序列得到的北半球结果相当一致,但全球平均,美国的序列在1940—1965年期间气温下降,而英国的序列则下降不明显。但近百年总的趋势都是变暖,1880年以来气温上升 $0.5-0.6^{\circ}\text{C}$ 。

2. 全球变暖趋势

分析近一百多年来的气温变化,究竟有哪些事实是对温室效应理论的支持,又有哪些事实与其相违背呢?根据琼斯的序列,自19世纪80年代到20世纪80年代,全球平均气温上升 0.6°C ,而且南、北两个半球大体一致,从这点来看似乎有利于认为增暖是温室效应造成的。此外,还有一个有力的证据,就是海平面高度上升。经过仔细分析的资料表明,在近一百多年中,全球海平面平均每10年上升1—2cm。这个数量级与根据海水膨胀及冰川融化所作的估计一致。因此,应该说全球气候变暖还是有一定证据的。

尽管如此,也还有人对变暖的趋势提出怀疑,例如有人^[14]就举出微波探测结果,认为从卫星得到的全球平均气温变化,与根据地面观测得到的不一致,可能是地面观测覆盖面不足造成的。因为,卫星观测与美国同时的气温变化就很一致。

不过,即使承认全球的变暖趋势,变暖的步调却与温室效应有所不同。因为,无论从那一个序列都可以看出,过去百年中全球或半球的变暖主要发生在两段时期。即1920—1940年期间及1975年以后。1975年之后大约升温 0.2°C 。所以,近百年来 的变暖有三分之二发生在1940年以前。但是,大气中 CO_2 增加四分之一,却有一多半发生在1940年之后。如果再考虑有些强烈的温室气体、如CFCs主要是在近几十年才迅速增长,这个矛盾就更突出了。

第二个矛盾是从50年代到70年代,北半球气温下降。根据汉森等的资料甚至全球都有所下降。显然,这不能用持续增加的 CO_2 的温室效应来解释。

第三个矛盾是变暖的地理分布,根据所有的大气环流模式, CO_2 加倍时,极区、冬季应该增暖最明显,但事实是北极地区的温度在30年代达到最高,此后,到60年代显著变冷。80年代稍有回升,但仍低于30年代的高峰。按照温室效应理论应该变暖最明显的地区的温度变化,却与温室气体的增长不一致。这不能不说是 对这种理论的一个挑战。

第四个矛盾是历史性的。气温观测记录开始于19世纪后半期,愈来愈多的资料证明,这时仍处于小冰河期的冷期中,或者说是 在冷期的后期,因此,从那时起到20世纪中气候的变暖,可能有一部分属于自然变化。这样,认为近百年由于温室效应气温上升 $0.5\text{—}0.6^{\circ}\text{C}$,可能估计偏高。

3. 中国的温度变化

20世纪以来,我国气温也有变暖的趋势,这是与北半球及全球一致的。但我国从50年代到70年代气温的下降则更为突出。以1920—1949年与1950—1979年,两个30年对比,气温下降了 0.45°C 。比北半球气温下降明显。本世纪前半期的变暖则比北半球早。20年代北半球气温正处于激烈上升的过程中,但在中国已成为近百年第二个最暖的10

年,仅次于40年代,另外80年代的变暖也不如北半球强烈。从70年代到80年代,北半球平均气温上升 0.24°C ,全球平均上升 0.23°C ,但中国仅上升 0.13°C 。而且由于70年代气温低,因此80年代虽较前10年有所变暖,但气温仍低于前70年(1910—1979年)平均,而不像北半球或全球,80年代成为近百年最暖的10年。显然,类似的局地性气温变化,也不是温室效应能轻易解释的。

三、温室效应的检测

1. 检测方法

检测(detection)的目的是证实温室效应。因此,只确定气候变暖还不能认为是检测,因为还没有证实这个变暖是由温室效应造成的。如何检测,就是要想办法证明信号的存在,一般用信噪比来度量。比较信号与噪声,凡信号强度超过噪声,可证明信号在一定程度上是可靠的。这里检测的是温室效应,所以与温室效应有关的气温变化是信号,而其它原因造成的低频变化则作为噪声。

因为气候模式有很大的不确定性,所以确定信号的强度很不容易。但目前也不是不可能的。例如为了考虑海洋对温室效应的巨大延缓作用,可以采用热平衡模式,或称为“箱—涌升—扩散模式”。这样能估计不同气候敏感度情况下的温室效应。气候敏感度即 CO_2 加倍可能产生的温度变化。取敏感度为 1°C , 2°C …… 5°C ,得到温度变化曲线。与近百年的观测序列比较。敏感度为 1°C 及 2°C 的曲线与实况较为接近。当然这仅是检测信号的一种方法。工作本身也说明信号检测的不确定性是很大的。

至于噪声,即指低频自然变化。检测噪声的方法有两种:一种是根据观测资料来分析。但这就要设法区分信号与噪声;另一种是用大气环流模式进行长时间的数值模拟。例如用地球物理流体动力学实验室(GFDL)

的海气环流模式对气温变化做了模拟。200年的模拟表明,在固定边界条件下可以得到与观测相比较的10年尺度变化,但未出现气候趋势。而用热平衡模式,在随机辐射强迫下,模拟出10年到百年尺度的低频年际变化,这反映了海洋热惯性的重要作用。这两种模拟都表明,目前观测到的温度变化与自然变化有相同数量级。在这种情况下用单一要素来检测温室效应是比较困难的。因此,建议采用“指纹法”,即用多种要素来综合检测。例如,除全球或半球平均气温之外,可以分析对流层、平流层温度变化,全球降水量变化,全球大气中水汽含量变化以及海平面变化等。可惜,这些要素大部分没有足够长的序列,或者很难求全球平均。所以只有海平面高度尚能提供一些较为可靠的信息。

2. 气候自然变率

从另一个角度看,如果能对气候的自然变率有所认识,亦可以帮助我们检测温室效应。这就关系到自然变率产生的原因。一般认为对10年到百年尺度的气候变化来讲,其自然变化的原因主要有两个,太阳辐射变化及火山活动。

虽然,人们早就怀疑太阳常数不是一个真正的常数,但一直不能得到证实。因为观测到的太阳常数变化与观测及计算误差属于同一数量级 $\sim 1\%$ 。所以直到80年代初雨云7号卫星上安装了空腔辐射仪,使太阳常数的观测精度提高到 0.05% ,才解决了这个140年以来悬而未决的问题。证明太阳常数确实不是真的常数,而且太阳黑子逐日变化的峰值与太阳常数的谷值相对应。黑子与太阳常数为负相关。但是,这个结果与大多数气候学家及天文学家的观点是矛盾的。例如有人认为蒙德尔极小是小冰河期形成的原因。黑子与太阳常数应为正相关,近来的研究^{[15][16][17]}认为,高频的(逐日)黑子变化太快,可能对气候影响不大。但太阳黑子多时,光

斑及太阳活动区辐射强。已经发现,由于光斑增加的辐照度,高于黑子冷却造成的辐照度下降。因此,太阳黑子与辐照度可能成正相关。1980—1986年期间太阳黑子减少,辐照度减少了大约 $1\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,就是一个很好的证明。可惜辐照度观测序列太短,是否如一些作者假定有同11年周期外包线平行的80年周期,尚需进一步证实。但是,即使存在这一周期,也同变暖的步调不完全一致。因为全球变暖在40年代初达到峰值,而太阳活动在50年代末才达到200多年的最高值。

至于火山活动,虽然已经证明,如1963年的阿贡火山爆发及1982年的厄·奇冲火山爆发均使太阳直接辐射下降 $20\sim 30\%$,但由于散射辐射几乎增加一倍,所以太阳总辐射仅下降 6% 左右。近来的研究^{[18][19][20]}表明,强烈的火山爆发造成的降温一般也不超过 0.5°C ,持续时间最多1—2年。然而,气候变暖的20年代到40年代,正好是火山活动的沉寂时期,以后到50年代火山活动又逐渐加强。这个变化趋势是三个因素(太阳辐射、火山活动及温室效应)中与温度变化趋势最相似的一个。不过也有矛盾之处,从70年代末到80年代,全球剧烈变暖,但火山活动并未明显减少。

所以,从过去一百多年的气候变化来看,这三个因素没有那一个能独立解释各时期的温度变化,因此,大多数作者同意,至少到目前为止,温室效应还没有超过其它两个因素的作用。用上一节的话来讲,就是信号与噪声处于同一数量级。不少用以上三个因素拟合温度变化,用统计方法检测温室效应的研究表明,由于温室效应主要影响趋势变化,因此在拟合过去百年来温度变化的总方差中不占主要地位,在拟合的方差中,火山活动占 50% ,太阳活动占 30% , CO_2 只占 20% 。但前两个因素主要拟合高频的变化。当然,这只是统计分析。物理分析的结果表明,前两个因素所能造成的

加热率均不大。但是,由于目前温室效应还不十分强,因此,其它两个因素可能抵消或加强温室效应则是无疑的。至少到本世纪末及下个世纪初仍可维持这种情况,但到下个世纪中期,温室效应已大大加强。那时,特别对低频变化,温室效应将占绝对优势。

从以上所介绍情况来看,虽然大多数科学家都不否认人类活动排放的CO₂及其它微量气体可能造成气候变暖,但其中未解决的问题还很多。甚至从工业化前到现在是否全球变暖也有人怀疑。或者至少未能肯定证明近百年约0.5℃左右的变暖在多大程度上是温室效应的结果。至于温室效应对一个地区气候的影响,不确定性就更大了。

在这种情况下,我们不仅要开展对全球的研究,更要注意对我国的研究。例如,我国温室气体排放的研究虽已开始,但还有许多事情要做,不仅要测定、估算各种温室气体的排放量,各种源汇以及大气中的浓度,还要研究探讨各种减少排放的方案。温室效应,或者说全球变暖可能对我国气候的影响还研究得很少。对农业、水利、交通、能源乃至对生态环境系统的影响的研究也需要逐步开展。在温室效应本身的研究方面,温室效应的检测是一个重要课题,不仅可以通过气候变化的时空结构进行检测,也可以通过对气候变化物理原因的分析进行检测。检测研究对改进、完善温室效应的理论有重要意义。

我国国家气候变化协调小组已经于1990年2月28日成立,下设三个工作组,科学评价组、影响研究组与对策研究组,且均已开始工作。相信我国对温室效应及其影响的研究今后会以更快的步伐前进。

参 考 文 献

[1] Barnola, J. M., D. Raynaud, Y. S. Krotkevitch, and C. Lorius, Vostok ice core: A 160000 year record of atmospheric CO₂, *Nature*, 329, 408-474, 1987.

[2] Keeling, C. D., R. B. Bacastow, A. F. Carter, S. C. Piper, T. P. Whorf, M. Heimann, W. C. Mook, and H. Roelofzen, A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 1. Analysis of observational data in: *Aspects of climate variability in the Pacific and the Western Americas*, D. H. Peterson(ed.), Geophysical Monograph 55, AGU, Washington (USA), 165-236, 1989.

[3] Siegenthaler, U., Carbon dioxide: it's natural cycle and anthropogenic perturbations. In *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling* (P. Buat-Menard, ed), 209-247. Reidel, 1986.

[4] Wuebbles, D. J., K. E. Grant, P. S. Connell, and J. E. Penner, The role of atmospheric chemistry in climate change, *J. Air Poll. Control Assoc.*, 39, 22-28, 1989.

[5] Lashof, D. A. and D. R. Ahuja, Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming, *Nature*, 344, 529-531, 1990.

[6] Siegenthaler, L., and H. Oeschger Biospheric CO₂ emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus*, 39B, 140-154, 1987.

[7] Mitchell, J. F. B., The "Greenhouse effect" and climate change, *Reviews of Geophysics* 27, 115-139, 1989.

[8] Schlesinger, M. E., and J. F. B. Mitchell, Climate model simulations of the equilibrium climatic response to increased carbon dioxide. *Reviews of Geophysics*, 25, 760-798, 1987.

[9] Manabe, S., K. Bryan, and M. D. Spelman, Transient response of a global ocean-atmosphere model to a doubling of atmospheric carbon dioxide, *J. Phys. Ocean.*, 20, 1990.

[10] Vinnikov, K. Ya., P. Ya. Groisman, K. M. Lagina, and A. A. Golubev, Variations in northern Hemisphere mean surface air temperature over 1881-1985. *Meteorology and Hydrology*, 1987(1), 45-53 (in Russian), 1987.

[11] Jones, P. D., Hemispheric surface air temperature variations: recent trends and an update to 1987, *J. Climate*, 1, 654-660, 1988.

[12] Hansen, J. and S. Lebedeff, Global surface temperatures: Update through 1987. *Geophys. Res. Letters*, 15, 323-326, 1988.

[13] Hansen, J. and S. Lebedeff, Global trends of measured surface air temperature, *J. Geophys. Res.*, 92, 13345-13372, 1987.

[14] Lindzen, R. S., Some coolness concerning

- global warming. *Bul. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 288-299, 1990.
- [15] Reid, G. C., Influence of solar variability on global sea surface temperature, *Nature*, 329, 142-143, 1987.
- [16] Wigley, T. M. L., The climate of past 100 00 years and the role of the Sun. In *Secular solar and geomagnetic variations in the last 10000 years* edited by F. R. Stephenson and A. W. Wolfendale, 209-224. Kluwen, 1988.
- [17] Foukal, P. and J. Lean, An empirical model of total solar irradiance variations between 1874 and 1988. *Science*, 247, 556-558, 1990.
- [18] Sear, C. B., P. M. Kelly, P. D., Jones, and C. M. Goodess, Global surface temperature responses to major volcanic eruptions. *Nature*, 330, 365-367, 1987.
- [19] Bradley, R. S., The Explosive volcanic eruption signal in Northern Hemisphere continental temperature records. *Climate Change*, 12, 221-243, 1988.
- [20] Mass, G. F. and D. A. Portman, Major volcanic eruptions and climate: a critical evaluation. *J. Climate*, 2, 566-593, 1989.

Recent studies on the greenhouse effect and its impacts on the climate

Wang Shaowu

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

The recent progress in the studies were reviewed on the following problems concerned the greenhouse effect, the estimation of greenhouse gases and their impacts on the climate, global warming of climate and detection of greenhouse effect. The uncertainties in the studies were emphasized. The problems that should be urgently investigated were outlined.