

大气、海洋、人类活动与气候变暖

丁一汇 耿全震

(国家气候中心,北京 100081)

提 要

根据国内外的研究,对由人类活动引起的全球变暖以及与其有关的碳循环和大气与海洋的反馈过程做了综述。

关键词:人类活动 全球变暖 大气与海洋 碳循环 反馈过程

引 言

我们赖以生存的地球已在过去 46 亿年的时间长河中慢慢地演化着。可是,最近它已开始明显地受到人类活动的影响^[1]。由于人类活动,大气中的温室气体(如 CO₂)在不断增加,致使全球温度升高。全球变暖及其对人类社会与生态系统的影响已成为人类面临的最重要问题之一^[2]。

人类活动到底能引起多大程度的全球气候变化,受气候系统中各种循环和反馈过程的制约,它们决定了气候系统对人为外部强迫源的敏感性。其中最主要的是碳循环和大气与海洋的反馈。如果碳循环的某个环节能将人为排放到大气中的 CO₂ 清除或吸收掉的话,CO₂ 增加并不会对气候产生什么明显影响。同样,如果 CO₂ 增加所引起的增温能够被大气或海洋的某些反馈过程所抵消的话,我们也许就不必为温室气体增加引起全球变暖而担心。而实际上,气候系统中的碳循环过程和气候系统对温室气体增加的响应和反馈极为复杂,我们还远远没有认识清楚。人类活动对气候变化的影响已是摆在我们面前

的重大的、具有挑战性的科学问题。本文根据国内外在这方面的研究^[1-17],就人类活动引起的全球变暖以及与其有关的碳循环过程和大气与海洋的反馈过程做一综述。

1 人类活动与全球变暖

全球变暖的基本原理可以通过考虑两种辐射能来理解,一种是加热地球表面的来自太阳的辐射,另一种是射向外空的来自地球和大气的热辐射。平均来说,这两种辐射一定平衡。如果这种平衡被破坏(如由于大气中 CO₂ 的增加),它可以通过地球表面温度的升高来恢复。

在上述的两种辐射平衡下,地球的平衡温度应是 -6℃。而事实上,在靠近地表的整个地球表面(海表和陆表)全年所观测到的平均温度达 15℃。地球之所以能保持如此温暖的温度,是由于除了占大气中大部分的既不吸收也不发射热辐射的氮气和氧气之外,在大气中还存在相当小量水汽、CO₂ 和一些其它的微量气体,它们会部分地吸收地表发射的热辐射,并引起实际平均地表温度升高(15℃),这样就造成了与仅包含氧气和氮气

的大气状况下所得的地表温度(-6°C)之间 21°C 的差别。这种现象称为“自然温室效应”,这些气体称作温室气体^[2]。将它称为“自然”是由于所有的大气气体(CFCs 除外)远在人类出现之前就已经存在了。下面我们谈到的温室效应是由人类活动(如化石燃料燃烧和森林破坏)在大气中产生的气体造成的,是一种“增强温室效应”^[2]。

自工业革命以来,由于人类的工业生产和诸如森林砍伐的其它活动,大气中 CO_2 含量已发生了明显的变化,到目前为止,大约变化了25%。每年人类通过这种排放把70亿吨碳送入大气中,其中许多可能要在大气中停留一百年或更长的时间。在缺乏控制因子的情况下,预计大气中的 CO_2 会加速增加,它的大气浓度很可能在未来几十年内成为工业革命前的两倍。

由于 CO_2 是来自地表面热辐射的良好吸收物质,它的含量增加正在导致全球地表的进一步变暖,这是“增强温室效应”所造成的。随着温度的增加,大气中的水汽含量也增加,由于水汽是最重要的温室气体,这使得 CO_2 的增暖效应加剧。如 CO_2 含量加倍的话,则目前对平均地表温度增加的最好估计是 2.5°C ^[2]。对全球平均温度来说,这是一个“大”的变化,正是这种被认为由 CO_2 增加所产生的全球变暖才引起了目前人们对它的关注。

全球温度的增加将导致全球气候变化,如果变化小,且进展十分缓慢,我们几乎肯定是能够适应它。然而,由于世界工业出现的迅速膨胀,这种变化不可能是小的或缓慢的。据估计,在未作任何努力以减少 CO_2 排放的情况下,全球平均温度每10年将上升约 0.25°C ,或一个世纪上升约 2.5°C ^[2]。这个数值听起来不大,尤其是与一般的昼夜温度变

化或逐日的温度变化相比而言。但是,这不是某一地点的温度,而是整个全球平均的温度。预测的100年上升约 2.5°C 的变率可能比过去一万年间任何时候全球平均温度的变化都快,并且,因为冰期的最冷时段与其间的暖期全球平均温度相差 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 左右,故我们可以看到,这种全球平均温度的变化可代表气候的一种重大变化。

科学家确信全球变暖的事实以及由人类活动造成的气候变化。但是,在增暖将有多大以及世界的不同部分气候变化将是怎样分布等方面仍然有很大的不确定性。虽然科学家已有某些依据,但还不能十分详细地说明什么地区将影响最大,并以什么方式受此影响,这需要加强研究来增加我们对科学预测的信度。

2 二氧化碳与碳循环

CO_2 提供了碳在自然界的许多碳库之间输送的最主要的方式,这一过程叫做碳循环。碳循环在决定人为排放的 CO_2 能引起多大程度的气候变化方面起着重要作用,因为最终对气候变化起作用的是留在大气中的 CO_2 量而不是人为排放 CO_2 的总量。大气中的总碳量大约有四分之一是进进出出的,其中的一半是与陆地生物群落交换,另一半则通过物理和化学过程穿过海洋表面。陆地和海洋碳库远大于大气中的碳含量^[3-4],所以,这些大的碳库的很小一点变化,都可以对大气浓度有很大的影响。

在人类活动成为一个重要的扰动之前,在比地质年代时间尺度短的期间内,各个碳库之间的交换是相当稳定的。在1750年前后工业化开始之前的几千年内,一直维持着一个稳定的平衡。工业革命打乱了这一平衡,造成 CO_2 浓度增加25%左右。从1959年以来,在夏威夷冒纳罗亚山顶附近的一个观象台进

行的精确测量结果表明,CO₂ 现在每年增加大约 0.5%。散布在大气中的 CO₂ 的这种增加,每年给大气碳库加上大约 38 亿吨(或 3.8Gt)碳^[2,5]。

全世界每年燃烧掉多少煤炭、石油和天然气,是很容易确定的。目前,总量大约是 6Gt,几乎全部作为 CO₂ 进入大气^[4]。要估计由于土地利用变化,特别是森林燃烧和腐烂释放到大气中的 CO₂ 量是不容易的。估计范围变化很大,大约为 0.5Gt 碳到 2.5Gt 碳^[4]。若取由土地利用变化和森林破坏释放 1.5Gt 碳这样一个中值,与每年由于化石燃料释放的 6Gt 碳相加,则每年由人类活动释放到大气中的 CO₂ 总计为 7.5Gt 碳左右。由于大气中的净增加每年大约是 3.8Gt 碳,所以,新增的 7.5Gt 碳的大约一半增加大气中的 CO₂ 浓度^[2],另外的一半则分配在其它两个碳库:海洋和生物群落之间。

在海洋里,CO₂ 溶解于水,它穿过整个海洋表面不断地与海面上的空气进行交换(每年交换 90Gt 碳左右),特别是当波浪破碎时。溶解在海洋表层水中的 CO₂ 浓度与海面之上的空气 CO₂ 浓度之间形成一种平衡。

在海洋表层 100m 左右的海水中,将很快发生这种变化,但是与更底层海洋的交换需要更长的时间。从海洋表层进入大部分深海需要几百年到上千年的时间。所以,海洋并不象根据大气与海洋这个大碳库的交换规模所揭示的那样,能给增加的大气 CO₂ 即刻提供一个汇。就短期变化而言,只有表层海水在碳循环中起主要作用。

海洋中的生物活动也起着一种重要作用^[6]。尽管海洋中生命物质的总量不是很大,但它具有很高的循环速率。海洋中的生命物质的生产率是陆地上的 30%~40%左右。绝大部分产物都是植物和动物浮游生物的,它

们经受一系列快速生命循环。当它们死亡和腐烂时,其中所含有的一部分碳将被向下输送到深水处或海底。就碳循环而言,在这里它们就不再参与几百年或几千年的循环。这一过程对碳循环的贡献叫做“生物泵”。“生物泵”的净效果是减少表层水中的碳含量,使得它可以从大气中获取更多的 CO₂ 以恢复表层平衡。它在确定冰期期间大气和海洋的 CO₂ 浓度中具有重要作用,在冰期的寒冷期内,海洋中增强的生物活动可能是造成大气 CO₂ 维持低浓度水平的原因——“生物泵”所具有的一种效应。但是,它对于少于几百年的时间尺度过程的影响是不大的。所以,到目前为止,它对于本世纪由人类活动产生的大气中过量碳的吸收(清除)的贡献是可以忽略的。据描述大气和海洋不同部分之间碳交换的碳循环模式(这些模式经检验有相当的真实性)的计算结果,估计每年加到大气中的 CO₂ 中,有 1.5~2.5Gt 碳进入海洋。大气和海洋中其它碳同位素相对分布的观测结果也证实了这种估计。

每年由人为源产生的、作为 CO₂ 进入大气的 7.5Gt 的碳,大约有一半留在大气中。如果其余部分有 2Gt 消失在海洋中,那么有待解释的是造成 1.7Gt 左右不平衡的原因。

这种不平衡,部分地来自进行收支估计时的不确定性。例如,从土地利用变化释放到大气中的 CO₂,有可能估计的不好;也许取每年 0.5Gt 这一估计下限,而不是 1.5Gt 的数值可能更接近实际情况。但是,不能以这种方式来解释所有的不平衡。其中必定有一些来自尚未很好定量化的陆地生物圈的变化。

有可能解释这种不平衡的陆地生物圈过程是什么呢?一个是 CO₂ 的增产效应。业以确认,在适当的条件下,CO₂ 的增加将导致植被生长的增加。但是,我们并不知道这种效应

究竟在多大程度上可以导致植物、树木和土壤中碳总量的增加。另一种过程就是我们愈来愈多地使用化肥,这有可能使更多的碳固定在全球农作物中。对这种不平衡的另外一种贡献可能来自森林的再生,特别是在中纬度地区。很明显,碳循环所涉及的过程是复杂的,而且全球各地显著不同。迫切需要更好地了解所有涉及到的过程并把它们量化^[7]。

我们已经说了两种反馈过程,一种是正反馈(海洋中的浮游生物增殖),另一种是负反馈(CO_2 增产效应)。还有其它三种正反馈可能是重要的,尽管我们目前的知识尚不足以完全精确地把它们量化。其中之一是更高的温度对呼吸的影响,特别是对土壤微生物的影响,导致 CO_2 释放的增加。第二种是由于气候变化引起的胁迫使生长减慢,特别是森林的枯萎。第三种是当温度升高时,多半发生在高纬度地区的甲烷释放增加——释放来自湿地或以水合物的形式(在外压下束缚在水分子中)密封在沉积物中的很大的甲烷库。甲烷的生成就是这些已有几百万年历史的沉积物中的有机物的分解。由于沉积物的深度,后一种反馈不大可能在下个世纪起重要作用。但是,如果全球变暖明显地继续增加一百年以上,估计由水合物来的释放有可能变成向大气释放甲烷的最大贡献者^[6]。

海洋和陆地生物群落很快地吸收加到大气中的 CO_2 的一半左右。另一半的情况如何呢?它最终将被其它的库,特别是海洋中的碳库所吸收。但是,在海洋的上部无法吸收任何重要的量。将它送到深海中去需要几百年的时间——即上层水与深层水混合的时间。

大气 CO_2 浓度响应变化的这种长时间具有重要的含义。例如,假定人类活动对大气的所有释放突然停止,大气 CO_2 浓度也不会

立即发生变化,它只会缓慢地降低。我们不能指望它在几百年内会达到其工业革命前的数值。

3 大气和海洋中的反馈

CO_2 增加到底能引起多大的气候变暖,取决于气候系统对 CO_2 增加的响应及其内部所发生的各种反馈过程,它们决定了气候系统对 CO_2 增加的敏感性程度。

3.1 大气中的反馈

水汽反馈是最重要的一种反馈,较温暖的大气将会使更多的水汽从海洋和陆面上蒸发出来。因此,平均来说较暖的大气也将较湿润,它将有较高的水汽含量。由于水汽是一个很强的温室气体,平均地说会产生正反馈,它将使由于二氧化碳加倍引起的全球平均温度升高增加 60%。

云在大气热平衡中非常重要。关键问题是,我们对由于人为影响而导致净的云强迫是增加还是减少这一问题甚至在定性意义上仍不能作出满意的回答。全球变暖,全球云的分布将如何变化?如何修改云的辐射强迫?^[8] 由于在模拟云和相关过程中的不确定性,对加倍 CO_2 试验模拟的全球平均响应有两倍或三倍的差异^[9-10]。

云-辐射反馈是一种非常复杂的反馈过程。云对大气中的辐射传输的影响有两种方式,首先它将一部分的太阳辐射反射回空间,这样就减少了系统获得的总的有用的能量。第二,对于来自地球表面的热辐射,它象毯子一样起到与温室气体相类似的作用,由于吸收其下地表的热辐射,同时它们自己也放射出热辐射,起到减少地面向空间损失热量的作用。

对于某种具体的云究竟那种作用占主导地位,取决于云的温度(这实际上取决于云的高度)和它的详细的光学特性(主要是指那些

决定其对太阳辐射反射率及云与热辐射相互作用的那些特性)。后者取决于云是由水还是由冰晶组成,决定于它的液态水和固态水的含量(细密程度),同时也决定于云滴的平均大小。一般来说低云的反射作用占上风,所以它常使地-气系统降温,而高云则与之相反,被毯效应占主导地位,它常使地-气系统增暖。因此,云的总体反馈效应既可能是正的也可能是负的^[2]。

气候对云量或云的结构的可能变化是非常敏感的。云量百分之几的变化就可以造成与二氧化碳加倍所造成的影响相当的影响^[2]。

3.2 海洋中的反馈

海洋在决定现存地球的气候方面起着相当大的作用,因此,它也可能对人类活动产生的气候变化有重要的影响。

海洋对气候的作用有三个重要的途径。首先,它是大气中水汽的主要来源,通过云中凝结作用释放的潜热为大气提供最大的一个热源。

第二,与大气相比较,它拥有很大的热容量,这意味着,在一个正在变暖的世界中,海洋的变暖要比大气慢的多。因此,海洋对温度变化的速率起着决定性的控制作用。

第三,通过海洋内部的环流可以重新分配整个气候系统内的能量。由海洋从赤道向极区传送的热量与大气传输的热量相似,但是输送的区域分布是很不相同的。即使海洋的区域热输送有很小的变化也可能对气候变化有重要的意义。因此,任何可能的气候变化的精确的模拟,特别是区域变化的模拟,必须包括对海洋结构及其动力学的描述。

对于时间尺度最长为10年的气候变化,只有海洋上层与大气有重大的相互作用。然而,更长时间的气候变化同深层海洋的联系

就变得重要了,深层环流变化的作用具有特殊的重要性。在这种深层海洋环流和水循环之间存在着一种重要的联系。美国GFDL气候模式的运行结果表明,当模式中CO₂的浓度增加时,在北大西洋有更多的降水发生。当CO₂加倍时深层温盐环流形成的速度减少了30%。当CO₂为四倍时深水温盐环流的形成就停止了,同时给该地区带来极大的气候变化。

3.3 极地冰盖

冰和雪的表面是太阳辐射的强烈的反射体(反射率是其反射能力的度量)。因此,在较温暖的表面,由于冰的融化,原来要被冰雪反射回空间的太阳辐射就被吸收了,这就导致进一步变暖。这是又一种正反馈作用,仅是这种作用就会使二氧化碳加倍引起的全球平均温度的上升增加20%^[2]。

4 结束语

由于气候系统的反馈和区域变化的复杂性,由人类活动引起的气候变化在科学上还有很大的不确定性,特别是关于气候变化的时间、幅度和区域特征,这主要是因为我们对于气候系统及其各种循环和反馈过程的理解还不够完善^[13]。

为减小不确定性,我们需要更好的模式,这些模式又需要更大更快的计算机。但首要的是,我们需要对气候系统所有方面具有比目前更完整的观测,以用来更真实地描述发生的气候变化以及用来标定和验证气候模式。

目前,尽管还有很多不确定性,科学家们还是可以比较有信心地做出一些重要的一般性的结论。在下个世纪CO₂排放增加照常构想下,气候变化的速率可能很大,或许比地球数千年以来所看到的变化都要大。许多生态系统(包括人类),可能不能很容易地适应如

此大的气候变化速率。因而,全球变暖及其对人类社
会与生态系统的影响是人类面临的最重要问题之一,是对科学界的巨大挑战。

参考文献

- 1 Subcommittee on Earth Sciences and Technology, Council for Aeronautics, Electronics and Other Advanced Technologies, Science and Technology Agency, Japan. Frontier Research Program for Global Change-Toward the Prediction of Global Change. 1997.
- 2 Houghton, J. H. Global Warming. Lion Publishing, 1994: 192pp. (有中译本,气象出版社,1997).
- 3 Schneider, S. H. The changing climate. Sci. Amer., September 1989:38~47.
- 4 Siegenthaler, U. and J. I. Sarnienton. Atmspheric carbon dioxide and the ocean. Nature, 365, 1993: 119~125.
- 5 Warson, R. T. et al. Greenhouse gases and aerosols. In Climate Change, The IPCC Scientific Assessment. Eds. J. H. Houghton, G. J. Jenkins and J. J. Ephraums, CUP, 1990:1~40.
- 6 Woodwell G. M. and F. T. Mackenzie. Biotic Feedback. CUP, 1994.
- 7 Sundquist, E. T.. Budgets of global carbon dioxide. Science, 259, 1993: 934~940.
- 8 WCRP. CLIVAR-A Study of Climate Variability and Predictability, Science Plan. August 1995, WCRP-89, WMO/TD No. 690.
- 9 Cess, R. D. et al. Intercomparison and interpretation of climate feedback processes in 19 atmospheric general circulation models. J. Geophys. Res., 95, 1990: 16601~16615.
- 10 Senior, C. A. and J. F. B. Mitchell. CO₂ and climate: The impact of cloud parameterizations, J. Climate, 6, 1993: 393~418.
- 11 Woods, J. D. The upper ocean and air-sea interaction in global climate. In The Global Climate. Ed. J. T. Houghton, Cambridge University Press, 1984:141~187.
- 12 Manabe, S. and R. J. Stouffer. Multiple-century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide. J. Climate, 7, 1994: 5~23.
- 13 IPCC 1990. Climate Change, The IPCC Scientific Assessment. Eds. J. H Houghton, G. J. Jenkins and J. J. Ephraums. CUP, 1990:365.
- 14 IPCC 1992. Climate Change 1992: The supplement Report to the IPCC Scientific Assessment, Eds. J. T. Houghton, B. A. Callander and S. K. Varney. CUP, 1994:198.
- 15 IPCC 1994. Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenario. Eds. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B. A. Callander, E. Haites, N. Harris and K. Maskell. CUP, 1994:339.
- 16 IPCC 1996. Climate Change 1996: The Science of Climate Change. Eds. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris A. Kattenberg and K. Maskell. CUP, 1994: 572.
- 17 中国国家气候变化协调小组第一工作组. 气候变化专题研究报告(四): 中国森林二氧化碳释放与吸收的评估, 1996:20.

Atmosphere, Ocean, Human Activity and Global Warming

Ding Yihui Geng Quanzhen

(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract

A review on the anthropogenic global warming, its associated carbon cycle and feedback processes in the atmosphere and ocean was given.

Key words: human activity global warming atmosphere and ocean carbon cycle feedback processes