

专题评述

大气中的二氧化碳含量

王明星 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文综述自然界二氧化碳的循环;大气中二氧化碳的源和汇,大气中二氧化碳的空间分布和时间变化;讨论人类活动对大气中二氧化碳的影响,特别是大气中二氧化碳浓度的变化趋势及其预测问题。

一、引 言

二氧化碳,象水汽和臭氧一样,是影响大气中辐射传输过程的一种主要气体,从而二氧化碳的含量是控制大气温度的一个重要因子。众所周知,地表和低层大气的温度比平流层和中层大气温度为高。大气中的二氧化碳将发自地表的和低层大气的热辐射吸收了,使之不能射出大气层以外,但高层大气的二氧化碳却以比较低的温度向外发出辐射。所以,二氧化碳的存在是使地气系统的射出辐射减小,也就是说,大气中的二氧化碳象温室的玻璃一样,可使地表面保持较高的温度。如果大气中的二氧化碳含量增加,地表和低层大气的温度就会升高。这说明大气中二氧化碳含量的变化有可能带来明显的气候效应。而自世界规模的工业化以来,人类活动的结果确实使大气中的二氧化碳含量在增加。因此,其气候效应问题就成了当今世界上最引人注目的环境问题之一。但是,地球上气候本身又存在着自然波动,存在短周期的波动和长周期的巨大变化,要证实人类活动增加大气中的二氧化碳所带来的气候效应是一件极为困难的事。从1958年以来的系统观测表明,到1978年为止大气中二氧化碳可能比工业化以前增加了约40ppm^[1]。模式计算表明,二氧化碳的这一增量所引起的气候效应小于气候的自然波动。但是,人们仍然担心,如果二氧化碳继续以现在观测到的增长速度递增,那末在几百年以后就将达到工业化以前浓度的5—10倍,就有可能引起灾难性的气候效应。

过去十几年中,人们利用各种简化的气候模式或复杂的大气环流模式来探讨大气中二氧化碳增加所引起的气候效应,例如 Manabe 等的一维和三维模式^[2,3], Smagorinsky 等的讨论^[4]等。虽然目前的结果分歧很大,不过大家趋向于预言二氧化碳增加一倍,全球地表温度将要增加2—4℃。这是一个可观的数值。如果二氧化碳增加到八倍,上述一维模式预告,全球地表平均温度将上升7℃,这一温升可与地质年代史上发生过的最大温度波

动相比拟。尽管这种估计在定量上还可怀疑,气候模式还有许多地方需要改进(甚至大大改进),但大气中二氧化碳含量增加一倍以上可以使气候有明显的变化,这是毋庸置疑的了。

本文不谈二氧化碳增加如何影响气候的问题,而是谈另一个根本的困难问题,即关于大气中二氧化碳浓度变化趋势的预测。这个问题不仅涉及到许多自然科学学科,如海洋化学、海洋动力学、大气化学、大气动力学、生物化学以及微生物学等等,还涉及到复杂的社会科学,如各国的人口政策、能源政策以及战争等复杂的社会问题。大气中二氧化碳的增加一方面取决于人为排放的增加(这取决于世界人口增长速度、能源需求量的增加速度和开发速度以及替代能源的开发速度等等),另一方面又取决于自然二氧化碳贮库对人为排放的二氧化碳的响应,特别是生物圈和海洋的响应。到目前为止,任何超过几十年的变化趋势预报都只不过是一种猜测。

二、自然界的二氧化碳循环

在人类活动产生明显冲击以前,大气中的二氧化碳处在一种动态平衡之中,其浓度长期保持在大约 290ppm^[5]。图1很简略地示出了自然界的碳化合物贮库,大气二氧化碳的源和汇以及各贮库之间的净交换通量^[5]。各贮库中的数字是由碳化合物的贮量计算出来的碳的含量,单位是 10^{20} 克(C),通量的单位是 10^{14} 克(C)/年。自然界的碳贮库主要是地壳沉淀物(其存在形式主要是碳酸盐,例如白垩石、白云石、石灰岩、碳酸钠等)和有机化石。但是这些物质的大部分是不参与大气二氧化碳循环的,它们的变化只在以地质年代为时间尺度才能显示出来。我们所关心的大气中二氧化碳循环过程主要是在地球生物圈和大气之间进行的,如图1所示。

地幔是排入大气中的气体碳化合物(主要是二氧化碳)的一个源,每年约有 0.273×10^{14}

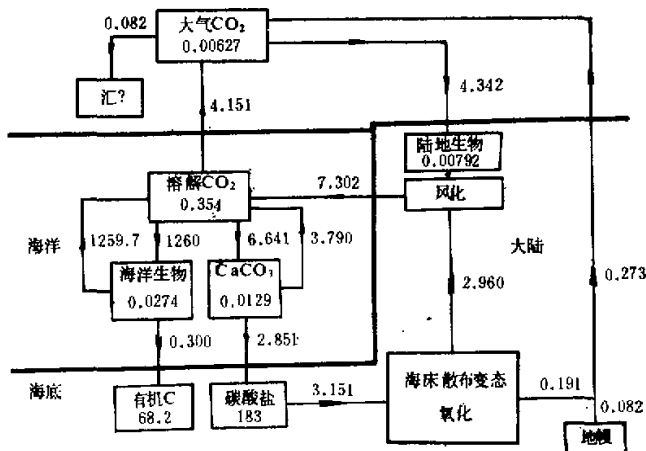


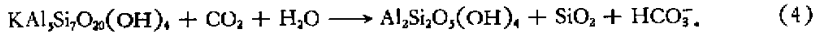
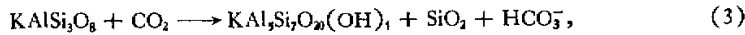
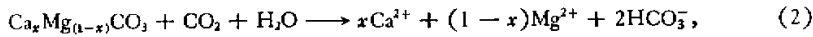
图1 人类活动冲击以前二氧化碳的循环。取自文献[5]。

克(C)由地幔进入大气;高纬度海洋因水温低溶解度大而吸收大气中的二氧化碳,但在低纬度海洋却向大气释放二氧化碳,全球平均净通量是从海洋到大气,其值为 4.151×10^{14} 克(C)/年,所以海洋也是大气二氧化碳的一个源。

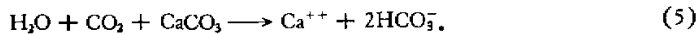
大气二氧化碳的一个重要汇是陆地上的生物。植物的光合作用吸收二氧化碳而产生有机物。光合作用的机制极为复杂,但对于二氧化碳循环的研究来说,这一过程可用一个简单的化学方程表示,即



其中 CH_2O 代表碳水化合物。当然,植物呼吸、死亡腐烂又会向大气排放二氧化碳。为简单起见,图1中只表示出了大气和陆地上生物之间二氧化碳交换的净通量,其值为 4.342×10^{14} 克(C)/年。此外,陆地上动植物的死亡腐烂还将二氧化碳输送到地面水(河流、湖泊)和地下水中去,使这些水体中二氧化碳含量处于过饱和状态,从而加速与水接触的碳酸盐的风化过程。这可以简单地用下列方程表示^[9]:



这种风化过程的产物有一部分流入海洋,增加了表层海水中的碳酸氢盐和碳酸盐离子,这是使表层海水中碳酸盐过饱和的原因之一。表层海水对碳酸盐的过饱和起着重要作用,它控制着工业产生的二氧化碳被海洋吸收的过程,海洋中通过碳酸盐的溶解而吸收工业产生的二氧化碳的过程很复杂,但可用下面的简化方程式来表示^[9]:



在海洋中,碳循环过程可分为两个子循环过程。首先,在混合层内存在光合氧化过程,这是因为表层海水中的微生物(浮游生物)也象陆地上植物一样能吸收二氧化碳,并在光的作用下生产有机物。但这些生物寿命很短,死亡很快,于是腐败氧化,放出二氧化碳,使表层海水中二氧化碳经常处于过饱和状态。还应指出,这些死亡生物还有一小部分会下沉到海水深处,在深海中腐败氧化或继续下沉,这一循环过程对大气二氧化碳的贡献目前还不清楚。另一个循环过程是含钙的有机物在深海中溶解为碳酸盐,其中一部分又在高纬度地区通过海水涌升回到表层海水之中来。上述两个循环都是不闭合的,因为下沉有机物和下沉的含钙碳酸盐物质都可有一部分下沉到海底,进入海底沉淀物中。海底沉淀物则又在海床缓慢地散布开来,并在海洋环流作用下参与海洋的其它化学过程,其中包括向陆地地下水供给碳酸盐。

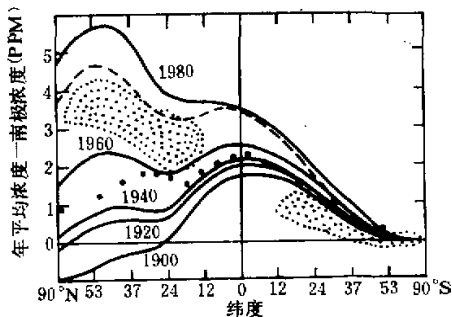


图2 二氧化碳浓度随纬度的分布;图中实线是模式计算结果^[6];·线是 Keeling 等人估计的 1957—1962 年的浓度分布^[12],阴影部分是 1979—1980 年联合观测得到的值^[11]

向陆地地下水供给碳酸盐。

大气二氧化碳可能还存在另一个重要的汇,图1中用问号(?)表示。对于

这个汇我们目前还认识甚少,它可能是暴露在空气中的地表岩石的风化,即地表碳酸盐吸收大气二氧化碳和水汽而风化。风化产物被雨水冲刷随河流进入海洋,这种风化过程能吸收多少二氧化碳,至今尚无定量估计。

三、大气中二氧化碳的自然分布

二氧化碳是一种很稳定的化学成分,它在大气中的寿命估计可达 10—20 年,在垂直方向上直到 80 公里高度,二氧化碳在空气中的混合比是基本不变的。上节我们已经提到,大气二氧化碳的自然源和汇在水平方向上分布很不均匀,陆地植物在热带较多,高纬度较少,海洋在高纬度吸收二氧化碳,在低纬度释放二氧化碳。因此,我们自然要问,大气中二氧化碳浓度在水平方向上分布是否均匀呢? 为了回答这个问题, Pearman 等人于 1981 年建立了一个二维模式来进行推算^[6]。这是一个箱模式,它把大气按质量平均分成 20 个纬圈(每个纬圈内包括的空气总质量相同);每一纬圈内的气柱再按气压高度分成 8 层,对流层内每层为 250hPa,平流层内每层 50hPa,对流层内的输送过程由平流和扩散两种过程表示,平流层内的运动则只有各向同性扩散。模式中所用的扩散系数是根据扩散实验观测结果得到的,在这些实验中用化学惰性气体 CCl_4F 作为示踪物。在模式中还考虑了人类活动排放的二氧化碳,假定 1900 年人类排放的二氧化碳可以忽略,以后的二氧化碳排放量则是根据化石燃料的年产量推算出来的。他们计算了 1900 年到 1980 年每年全球大气中二氧化碳的分布,结果如图 2 所示。模式计算的结果与 Bolin 和 Keeling 的估计^[7]和 1978—1979 年的全球观测^[8]大致相同。因此,这一模式计算结果可以作为全球二氧化碳分布的一个粗略估计。即在人类活动有影响以前,赤道附近浓度最高,两极最低,尤其是在北极更低些(北半球因陆地生物较多,所以浓度比南半球更低些)。

四、人类活动对大气二氧化碳浓度的冲击

1979 年人类活动(主要是化石燃料燃烧和水泥生产)向大气中排放的二氧化碳达 5340×10^6 吨(C)^[9],这是一个相当可观的通量。如果人类活动排放出来的二氧化碳在大气中累积起来,势必造成其浓度逐年增加。

大气中二氧化碳浓度的测量始于 100 多年以前,但是早期的测量是很粗的,结果很不可靠。1957 年 Keeling 等人^[10],在 Mauna Loa(19.5°N, 155.6°W)观测站和南极设立了二氧化碳连续监测站,从 1958 年起利用红外技术进行系统的连续观测。此后,瑞典的 Bischof^[11]和澳大利亚的 Pearman^[12]相继开展了大气二氧化碳浓度的飞机观测,美国气象局(现在的 NOAA)还利用地面气象站进行了二氧化碳空间分布的观测^[13],此外还有一些短期的观测。

上述这些观测已经清楚地揭露了下列事实: 大气中二氧化碳在垂直方向上分布均匀,在水平方向上分布不均匀;二氧化碳的浓度不仅有明显的季节变化,而且有明显的逐年增加的趋势,这表明,人类活动的冲击已经改变了,且正在改变着二氧化碳的自然循环。图 3 是在 Mauna Loa 观测站和南极观测到的月平均大气二氧化碳浓度^[10]。由图可

以看出,大气二氧化碳浓度有非常明显的季节波动,秋季浓度最低,春季浓度最高,变化幅度约为 6ppm。同时期南极的观测资料显示了较小的变化幅度,这说明二氧化碳浓度的季节变化主要是由陆地生物生长率的季节变化造成的,北半球夏季植物生长旺盛,吸收二氧化碳较多,造成秋季浓度最低。图 3 还清楚地显示了长期变化趋势。用简单的经验拟合方法处理 Mauna Loa 和南极的观测资料,得到:大气中二氧化碳每年约增加 0.7 ppm,从 1958 年到 1977 年的 20 年间约增加 14ppm (从 1958 年的 316 ppm 增加到 1977 年的约 330 ppm)。我们还注意到后 10 年增长速率比前 10 年要更快些。人们普遍认为大气中二氧化碳的这种增加主要是由于化石燃料燃烧排放和水泥工业的排放;但也有人提出,热带森林的大量采伐也可能使大气二氧化碳增多,不过这后者的贡献也许是微不足道的^[4]。联合国统计资料表明,从 1958 年至 1977 年间,化石燃料燃烧和水泥工业排放的二氧化碳总计达 7×10^{10} 吨(C)^[9],这差不多相当于同期大气二氧化碳增加量的二倍。就是说,人类排放的二氧化碳并不完全在大气中累积,而是有一部分被其它贮库吸收。可见,人类活动的冲击不仅影响大气,也影响了除大气之外的自然界碳循环过程,这使大气二氧化碳研究更为复杂化了。若把大气中二氧化碳增加的量与人类向大气排放的二氧化碳总量之比称为气留比 (Airbone Fraction, 简记作 AF),计算表明,AF 是逐年变化的,而且有 4 年

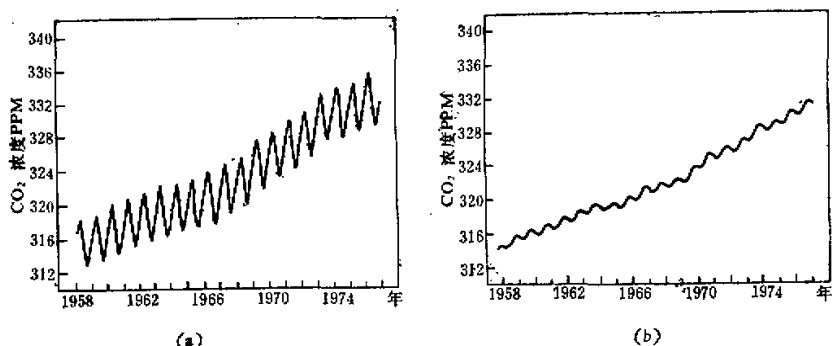


图 3 观测到的大气二氧化碳浓度变化,取自文献[10]。(a) Mauna Loa, (b) 南极

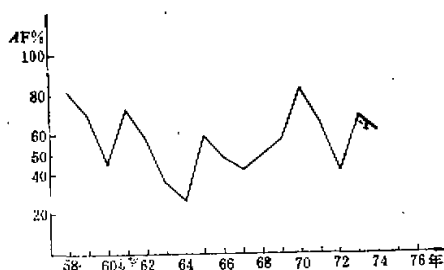


图 4 气留比的逐年变化

氧化碳也集中在这一地区。所以人类活动不仅使全球平均二氧化碳浓度增加,而且会明显地改变其空间分布。图 2 所示的观测结果以及 Pearman^[6] 等人的模式计算就说明了

周期,这和南极二氧化碳浓度的长期变化趋势中的周期性一致,如图 4 所示。进一步研究表明,这种变化与气压波动和海水温度的变化有关^[11]。这说明,人类排放的二氧化碳可能有很大一部分被海洋所吸收,海洋吸收能力的波动就造成 AF 的年际变化。

由于世界人口和大部分工业集中在北半球中纬度地区,人类活动排放的二

这一点。

五、 大气中二氧化碳继续增加的趋势

要成功地预告未来几十年至几百年大气中二氧化碳的浓度, 取决于对化石燃料消耗情况的正确估计, 和人类排放的二氧化碳的气留比 (AF)。可以说, 前者基本上属于社会科学的范畴, 依赖于社会的发展、人口增长速度、世界各国的经济政策、价格政策、能源政策、以及战争等因素; 还依赖于科学发展能否改变能源的结构, 或替代能源开发的程度; 后者则是一个极为复杂的自然科学问题, 依赖于整个自然界对大气中二氧化碳含量增长的响应, 涉及到海洋化学、海洋环流、海洋地质、大气化学、大气环流和生物化学等。因此, 就我们现在的知识水平而言, 任何关于大气二氧化碳浓度的长期预报 (比如 20 年以后) 只不过是一种粗略的估计, 其可信度是不高的。比较可信的是二十年以内的短期预测, 例如我们可以预计到本世纪末, 世界上替代能源将不大可能有重大突破, 人类将继续依靠化石燃料作为主要能源。因此, 可以大体上认为: 全球能源消耗基本上以目前的增长速度继续增长。人类排放到大气中的二氧化碳将继续指数上升, 年增长率可达 4% 左右^[5]。从目前大气中二氧化碳的浓度出发, 可以预期: 到 2000 年, 人类排放二氧化碳还不致改变二氧化碳各自然贮库的吸收和排放机制, 因而 AF 值将仍然保持现有水平, 而只有很小的短期波动。根据这样的分析, 简单的计算可以得出, 到 2000 年大气中二氧化碳含量可达 375—400ppm, 即比现在增加 40—70ppm。二氧化碳这样一个增加量也许不会引起明显的气候效应。因此 2000 年以后二氧化碳将怎样继续增长便是人们更为关心的问题了。

为了预测公元 2000 年后二氧化碳的增长, 人们作了种种假设, 建立了各种各样的预测模式, 预测结果相差很大。其中, Hubbert^[46] 根据对可被人类利用的化石燃料资源的估计来做预测, 在化石燃料最终消耗完之前大气二氧化碳可达到工业化以前的水平的 5—9 倍; Base 等人^[47]修改了 Hubbert 的模式 (考虑进人类可能对一些难以利用的化石燃料的开发), 认为大气中二氧化碳最高将能达到工业化前的 12 倍。Ziman 等人^[48]则预言将达 13—14 倍。Perry 和 Landsberg^[49] 认为最好的估计应是 9 倍。

Keeling 等人^[17]建立了一个稍为严密些的六贮库箱模式, 他们假定陆地生物的生长速率主要受到温度、阳光、水和土壤养分的限制, 大气二氧化碳的增长将不会明显改变陆地生物的生长速率 (因为现在的二氧化碳含量对生物生长来说已经足够); 海洋是二氧化碳的巨大贮库, 其贮量远远超过大气和陆地生物, 所以工业产生的二氧化碳的 AF 值将主要受海洋过程所控制。但是溶于海水的碳化物只有 10% 是碳酸盐离子, 它决定着海水吸收二氧化碳的能力。工业产生的二氧化碳将与这些离子起化学反应, 于是碳酸盐离子、碳酸氢盐离子和溶解二氧化碳之间将达到某种平衡, 增加水中的二氧化碳分压力, 这就反过来不利于二氧化碳的继续吸收。另外, 能吸收二氧化碳的只有表层海水, 而表层海水与深层海水的交换则是很缓慢的。于是, Keeling 等人只好在模式中通过某个系数来考虑这些复杂的因素。这样, 根据对不同的化石燃料消耗增长速率的预测就可预测大气中二氧化碳的变化趋势。他们设化石燃料消耗的增长速率 R 可用下式表示:

$$R = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = r \left[1 - \left(\frac{N}{N_a} \right)^n \right], \quad (6)$$

其中, N 为已消耗的化石燃料, N_a 是最终可被利用的化石燃料总量, r 是一个经验常数, n 是可调整的参数 (表示化石燃料消耗速率不同的主要参数)。则 Keeling 等人的模式预告的大气中二氧化碳的增长趋势如图 5 所示。图中不同曲线相当于 n 取不同数值时的计算结果。可以看出, 不管 n 取什么样的数值, 大气中二氧化碳都将先迅速增加, 达到峰值之后又缓慢下降; 但 n 取不同值时峰值到来的时间和峰值高度不同。如 n 取 2, 大气二氧化碳将很快指数上升, 上升速率与目前观测到的上升速率一致。到 2100 年前后达到峰值, 比 1950 年约增加 8 倍。如取 $n = 0.5$, 则大气二氧化碳增长速率将明显地比现在观测到的增长速率为小, 在 2175 年前后达到极大, 其值为 1950 年的 7 倍左右。

Keeling 等人的模式没有考虑海水中碳酸盐固体的溶解和海底沉淀物的溶解。有人提出^[19]随着大气二氧化碳增加, 海水中的碳酸盐粒子和海底沉淀物中的碳酸盐有可能溶解而参与吸收二氧化碳的过程, 从而有可能大大增强海水吸收工业产生的二氧化碳的能力。但是, 也有人认为^[20], 既然表层海水所含碳酸盐是过饱和的, 而且工业所产生的二氧化碳很难到达二氧化碳并未饱和的深水层以及海底, 因而海水中的碳酸盐粒子和海底沉淀物很难因大气中二氧化碳增加而溶解。根据深海海水交换的分析^[20], 工业产生的二氧化碳到达溶跃层以下深度 (从而可能引起溶解) 的时间尺度是 1000 年以上。因此, 考虑深海中碳酸盐溶解的过程将不会明显改变模式预告的大气二氧化碳峰值和峰值到来的时间, 而只改变峰值到来以后 (1000 年以后) 下降的速率。但是, 大气二氧化碳增加是否会引起表层水中碳酸盐溶解而其过饱和度仍保持现有水平呢? 如果考虑到这种可能性, 则模式预告的大气二氧化碳峰值将只有工业化前的 5 倍左右, 而在达到峰值后会较快地下降到 1.7 倍左右^[21]。看来, 进一步研究海洋中碳酸盐的化学平衡将在二氧化碳未来增长趋势的预报中起着关键的作用。

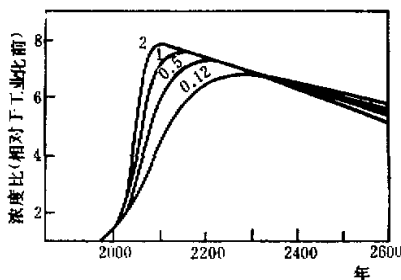


图 5 6 贮库箱模式预告的大气二氧化碳增加趋势, 取自文献[1]

参 考 文 献

- [1] Keeling, C. D. and Bacastow R. B., 1977, in *Energy and Climate*, pp. 72—96, National Academy of Sciences.
- [2] Manabe, S. and Wetherald R., 1967, *J. Atmos. Sci.* **24**, 241—259.
- [3] Manabe, S. and Wetherald R., 1975, *J. Atmos. Sci.* **32**, 3—15.
- [4] Smagorinsky, J., 1977, in *Energy and Climate*, pp. 130—140, National Academy of Sciences
- [5] Pytkowicz, R. M. and Small L. F., 1977, *Marine Science*, **6**, 7—22.
- [6] Pearman, G. I. et al., 1981, WCP-14, pp. 179—186.
- [7] Bolin, B. and Keeling C. D., 1963, *J. G. R.*, **68**, 3899—3920.
- [8] Fraser, P. J. et al., 1981, WCP-14, pp. 179—186.
- [9] Rotty, R. M., 1981, WCP-14, pp. 123—134.
- [10] Keeling, C. D., 1978, Mauna Loa Observatory 20th Anniversary Report, pp. 36—55.
- [11] Bischof, W., 1973, *Tellus*, **25**, 305—308.
- [12] Pearmann, G. I. and Garrant, J. R., 1973, *Tellus*, **25**, 309—313.
- [13] Woodwell, G. M. et al., 1973, *J. G. R.*, **78**, 932—940.
- [14] Machta, L. et al., 1977, *Marine Science*, **6**, 131—144.
- [15] Rotty, R. M., 1977, *Marine Science*, **6**, 167—181.
- [16] Hubbert, M. K., 1977, in *Energy and Climate*, pp. 157—242, National Academy of Sciences.
- [17] Keeling, C. D. et al., 1977, in *Energy and Climate*, pp. 72—96, National Academy of Sciences
- [18] Zimen, K. E. and Altenheim F. K., 1973, *Naturwissenschaften*, **60**, 198—207.
- [19] Perry, H. and Landsbery H. H., 1977, in *Energy and Climate*, pp. 1—50, National Academy of Sciences.
- [20] Broecker, W. S. and Takahashi T., 1977, *Marine Science*, **6**, 213—242.
- [21] Broecker, W. S., 1977, *Marine Science*, **6**, 207—212.

CARBON DIOXIDE IN THE ATMOSPHERE—A REVIEW

Wang Mingxing Zeng Qingcun

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

The carbon dioxide cycle in the natural atmosphere, sources and sinks, distributions and time variations of atmospheric carbon dioxide are summarized. The impact of man's activity on the cycle of atmospheric carbon dioxide and the increasing trend of the concentration of atmospheric carbon dioxide are discussed. Problems in the prediction of the secular trend of atmospheric carbon dioxide are reviewed.