

# 二氧化碳在地球表层的循环

杉村行勇

**前言** CO<sub>2</sub>等温室效应气体的增加造成全球气候变暖,已经成为当代科学界和政治界的一个中心课题。1958年在夏威夷冒纳罗亚火山开始进行的大气CO<sub>2</sub>测定,查明了大气中CO<sub>2</sub>浓度以1~1.5ppm的年率稳步增加(图1)。据此推算,加上矿物燃料消费量增加和将来对能源的需求以及以CO<sub>2</sub>为引发剂的温室效应气体的增加,到二十一世纪中叶地表平均温度将上升1.5~4.5℃。

回顾过去地球的历史,在最后一次冰期,地球平均气温降低了大约2℃,根据采自南极东方站基地深层冰样包裹体气体的分析,当时大气中的CO<sub>2</sub>浓度减少到180ppm,冰期结束时空气中CO<sub>2</sub>浓度又回升到280ppm,其后一直到十九世纪初,大气中CO<sub>2</sub>浓度没有多大的变化(图2)。

地球平均气温降低2℃,引起大陆冰川扩大,海面降低。所以设想今后平均气温若升高3℃,当然会使大陆冰川缩小,海面升高,也就是说冰期时寒冷而干燥的地球,将变得比现在还要温暖而湿润。

地球一方面接受来自太阳的短波辐射,另一方面又从自己的表面通过大气窗(8~14微米)向宇宙空间发射红外辐射线,从而使地球表面气温保持在目前的平均15℃水平上。地球上大气、海洋和生物间进行着水蒸发及CO<sub>2</sub>的交换,象恒温器那样使地球的平均气温保持恒定。假如地球大气中既无水蒸气,也无CO<sub>2</sub>,那么地球就将不是水行星,而是冰行星。庆幸  
\*\*\*\*\*  
消除任何单个观点下所固有的偏见,假想的证实和理论的确切描述都是不足的。

然而,美国和世界上其它国家的地理工作者之间已存在着日益发展的研究兴趣与技术的交汇,世界规模的研究合作正在形成。特别地,人们对用比较来自别国的数据验证地理模型和结论颇感兴趣,数个国际合作课题已经确定(包括本文提到的一些)。不但这种比较研究将扩大理论结论的内容,而且兴趣相同的各国地理工作者的协同工作也将提供一种传播新理论、新方法的有效途径。因为提供了确定的机会来提高国际理解和知识的相互交换,这种国际合作也是具有先进意义的。

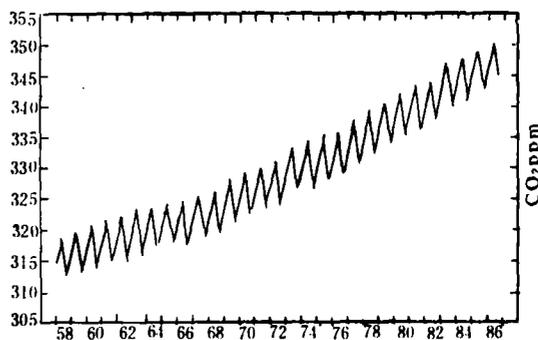


图1 夏威夷冒纳罗亚火山的CO<sub>2</sub>浓度

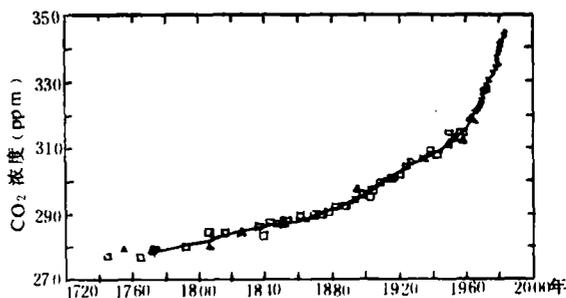


图2 根据南极萨普尔基地大陆冰川冰核分析得出的以往的CO<sub>2</sub>浓度(伯尔尼大学的结果)

的是，地球自出现生物以来，既没有冻结过，也没有沸腾过。

假如像CO<sub>2</sub>、甲烷及卤化烃类那样能吸收大气窗的红外线而且能长期滞留在大气中的气体，在短时间里剧增，超过地球的自我调控能力的话，就可以断定地球大气温度将会升高。依据温度效应理论，这是理所当然的。

这种观点，最先由福里埃(Fourier)于1827年提出，阿尔亨尼斯(Arrhenius)和钱伯林(Chamberlin)等人于1897将此观点用于解释冰期的消长，卡伦德(Callendar)于1938年将其数学公式化，真锅淑一郎于1967年以地球大气环流模型的形式，使这种观点更趋精密。

因而现在成问题的气候变暖，基本上应看作是地球上的碳循环被人类扰乱并对地球未来产生影响的问题。人类并不是故意通过燃烧矿物燃料释放CO<sub>2</sub>来引起气候变化，但对这种意想不到的大规模的地球物理实验后果，人类必须承担全部责任。

1. 气候模式精密化所必需的基础数据和概念 如果今后仍继续向大气释放CO<sub>2</sub>，大气中CO<sub>2</sub>浓度将有怎样的长期变化，目前尚无科学性的解释。总之问题的根本是碳循环问题。现在地球上，海洋吸收CO<sub>2</sub>的通量，大气、生物之间的CO<sub>2</sub>交换通量和其他一些通量，还不十分清楚，这是问题的症结所在。因此对未来的预测是极其困难的。

除了弄清碳循环外，目前另一个不明确的问题是云与气候之间的相互作用。推测温暖湿润的地球大气中云的行为又是一个难点。

以下列举阐明碳循环所必需的几个问题：(a)估算将来矿物燃料燃烧能放出多少CO<sub>2</sub>，过去释放的历史又如何。(b)弄清大气中CO<sub>2</sub>浓度的时间系列变化，年际变化及地域变化、过去几百年乃至几百万年的变化，碳循环在遭到人类扰乱前是否处于稳定状态。(c)陆地生物与大气CO<sub>2</sub>是否处于平衡状态？陆地生物是CO<sub>2</sub>的发生源还是吸收体？陆地生态系统与大气CO<sub>2</sub>交换，发生多大的变化？在过去的100年里，大气与陆地生态系统的平均通量是否有变化。(d)大气与海洋之间的CO<sub>2</sub>交换有怎样的时间变化，被海洋吸收的速度的平均值有多大？地域和季节如何变化？CO<sub>2</sub>自海洋表层向深层移动的速度大约是多少？(e)在目前碳循环模式中是否有未被考虑到的大气CO<sub>2</sub>的重要发生源和吸收体？自然的CO<sub>2</sub>通量，将来是否可能发生巨大变化？

为了解决上述问题而开展的研究，对气候模式精密化是必要的，其中占地球表面70%的海洋的碳循环的研究，恐怕是掌握地球环境未来的钥匙。

2. CO<sub>2</sub>的自然循环 表1列出地球主要碳源的分布和通量数据。对各种CO<sub>2</sub>贮存库，设其现存量和通量是稳定的，则CO<sub>2</sub>贮存库滞留时间(=现存量/通量)也一并列于表中。

大气中CO<sub>2</sub>的滞留时间，在与海洋之间交换中，估计为8年；与生物圈的交换估计为9年，总体大约为4年。值得注意的是，空气与其它贮存库间的分配比率是1:60。560×10<sup>9</sup>吨的陆地生物的净基础生产量为65×10<sup>9</sup>吨，而3×10<sup>9</sup>吨海洋生物的净基础生产量却多达45×10<sup>9</sup>吨，因此海洋在CO<sub>2</sub>循环中的作用是极大的。一般认为，海洋是通过CO<sub>2</sub>的溶解和生物生产这两种交换方式调节着大气中的CO<sub>2</sub>浓度的。

(1)大气与海洋间的CO<sub>2</sub>交换 大气和海洋间经常进行着CO<sub>2</sub>交换，在遭受人类扰乱前的自然条件下，全球的CO<sub>2</sub>吸收和释放大体保持平衡。

最简单的CO<sub>2</sub>交换量估算是：假定大气、海洋这二个系统之间的放射性碳的收支处于稳定状态来进行计算的。计算结果交换量为216克碳/米<sup>2</sup>年或78×10<sup>9</sup>吨碳/年(±25%)。这是一个标准。

表1 地球上主要的碳储存库和各项通量

储 存 库	10 <sup>9</sup> 吨碳
大 气: CO <sub>2</sub> 1850年以前约280ppm	591
1985年 345ppm	732
其他气体: CH <sub>4</sub> 1.7ppm	1
CO 0.1ppm	
海 洋: 无机碳 (碳酸全量)	37100
溶解有机碳	2700
海洋生物	3
陆地生物圈: 陆上动植物	560
土壤及腐殖质 (历史时期以前200~500)	1500
地下水:	450
沉积物: 无机碳	约60000000
有机碳	约12000000
矿物燃料	约5500
通量 (全量)	10 <sup>9</sup> 吨碳/年
大气—海洋, CO <sub>2</sub> 变换	78
大气—陆上生物, 光合作用/呼吸 (纯基础生产)	65
海洋光合作用	45
海底沉积	0.2
火山作用	约0.9
矿物燃料燃烧 (1985)	5.5
滞留时间: $r = \text{现存量} / \text{通量}$	年
大气 (产业革命以前): 全交换	1
仅与海洋交换	8
仅与生物圈交换	9
陆地生态系统: 光合作用/呼吸	11
海洋生态系统: 光合作用呼吸	0.07
海洋: 与大气交换	190
仅仅沉积	180000
大气圈 + 生物圈 + 海洋: 沉积	210000

这种计算不能获得地区性变幅和季节变化等的资料, 因此必须测定广域大气与海洋间的CO<sub>2</sub>分压差。六十年代中期起我们研究室开始了遍及太平洋广域的CO<sub>2</sub>分压研究。第一个课题是研制在航船上自动观测大气与表层海水CO<sub>2</sub>的装置, 并研究提高其观测精度。最终研制完成的是能使海水与一定量空气喷淋保持接触, 把建立平衡状态的平衡器与集中型红外线气体分析计连结在一起的装置 (详见图3)。从船底用泵抽取海水不断供应, 就可以运用这种分析仪器。

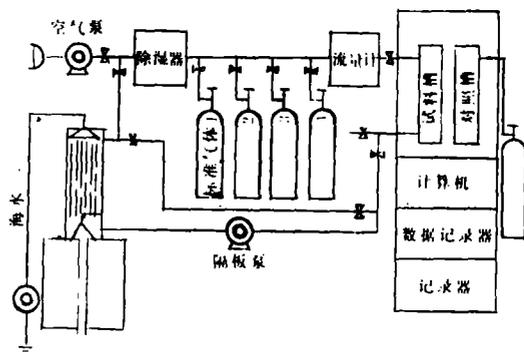


图3 大气、海洋CO<sub>2</sub>分压测定装置模式图

通过1968~1972年太平洋全域的调查研究, 绘制了大气与海洋间CO<sub>2</sub>分压差分布图。如

果加入风速引起的交换系数的变化，计算结果表明，太平洋的南北中纬度地区为吸收，赤道及南太平洋东部为释放，释放量为  $2 \times 10^9$  吨/年，吸收量为  $10^9$  吨/年，总的来说太平洋是释放量超过吸收量。

图 4 所示，赤道海域海水中的  $\text{CO}_2$ ，对于空气来说是过饱和，当时的研究是以大西洋为中心，世界上普遍认为海洋吸收  $\text{CO}_2$  是理所当然，所以我们的研究结果未被重视。

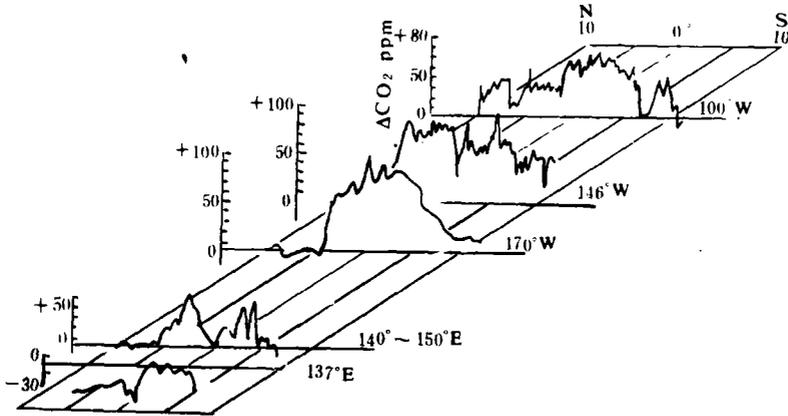


图 4 太平洋赤道海域表面海水的  $\text{CO}_2$  分压差

最近我们整理了全球的测定结果，并发表了应用交换系数计算的论文，结果如图 5 所示，证实了我们的结果，从全球角度看，大西洋吸收、太平洋释放，总体收支平衡。

在得出观测结果以前，应用大气与海洋相互作用的独立系统模型，进行了海洋吸收  $\text{CO}_2$  的推算研究。研制了各种模式，其中有一个模式，把海洋吸收量定为  $2 \times 10^9$  吨/年，是从计算上求得矿物燃料燃烧释放量  $5 \times 10^9$  吨/年中，仅 40% 为海洋吸收。同是这些研究人员，根据实际观测数据进行收支计算，海洋却是  $\text{CO}_2$  的释放源 ( $0.3 \times 10^9$  吨/年)，与模式计算结果不一致。这是个问题。

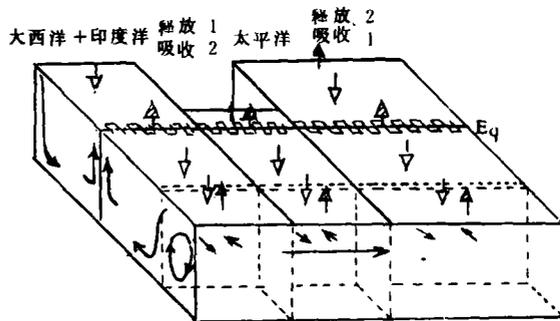


图 5 世界三大洋  $\text{CO}_2$  通量的方向，单位  $10^9$  吨碳/年

(2) 大气、海洋间  $\text{CO}_2$  交换的地区间、季节及年际变化 表层海水的温度随季节而变化，此外厄尔尼诺现象也导致其地域性的变化。对于空气中  $\text{CO}_2$  浓度的持续增加，表层海水将有怎样的反应呢？有如下的问题：海水与大气进行  $\text{CO}_2$  交换的动力来自两方面，一是由水温与压力差形成的“溶解度泵”，二是由营养盐与浮游生物作用而形成的“浮游生物泵”。水温变化  $1^\circ\text{C}$ ，促使  $\text{CO}_2$  分压发生 4% 的变化。如果只依赖于温度，则同一海域  $\text{CO}_2$  分压是夏季升高，而冬季降低。深层海水通过上升流供给海洋表层，造成浮游植物的增殖，这时随着营养盐的加入，引起碳酸物质的增加，而浮游植物的增殖对碳酸盐的摄取程度，决定着  $\text{CO}_2$  分压是增加抑或减少。

# 对称丘陵背风区自然降尘特征

[比利时] 德克·戈斯勒

**摘要** 本文报导研究细粒粉尘物质(黄土)在对称丘陵背风区沉降特征的风洞实验。注意力集中于黄土顺风越过丘陵的沉积模式是否具有波动的问题(可与著名的Karman涡旋尾流相比较)。

通常“溶解度泵”强度是“浮游生物泵”的20—40%，其作用强度随海域而不同，“溶解度泵”主要分布在北太平洋北部，这里是世界典型的CO<sub>2</sub>吸收区；“浮游生物泵”比“溶解度泵”作用强的地区是赤道太平洋和大西洋，这里是CO<sub>2</sub>的发生区。

今后的课题是按区域、按季节对这两个作用强弱程度进行定量研究。从年际变化来看，1969年与1984年CO<sub>2</sub>分压比较结果表明，南极海平均为24.4ppm，北太平洋为20.0ppm，平均每年增加1.4~1.6ppm。在北大西洋马尾藻海，从1958年到1982年，每年也增加1.5ppm。随着空气中CO<sub>2</sub>浓度的升高，表层海水的CO<sub>2</sub>分压也在增加。但其增加量不管如何偏高地估算，也不会超过 $0.5 \times 10^9$ 吨/年，因此与同一时期平均排放量 $3.9 \times 10^9$ 吨/年相比，不过是其1/8而已。

除上述的平均变化外，在热带海洋中还存在厄尔尼诺现象和拉尼娜现象，造成太平洋东部上升流出现周期性的减少、增加，它使赤道地区CO<sub>2</sub>释放量发生大幅度变化，中纬度海域CO<sub>2</sub>分压变化较小，而低纬度海域CO<sub>2</sub>分压常常发生增减变化，这样的自然变化对大气中CO<sub>2</sub>有何影响，尚不太清楚。

**3. 陆地植被与CO<sub>2</sub>** 空气中的CO<sub>2</sub>重复地发生着日变化和季节变化，这种变化基本上是由植物的光合作用和呼吸作用造成的。因此只要生物圈不被破坏，植被对CO<sub>2</sub>既不是发生源，也不是吸收体，收支应该是平衡的。

我们总结了筑波市地表大气中CO<sub>2</sub>的日变化和季节变化，但CO<sub>2</sub>的增减并不能对其变化原因提供任何情报。地球碳源由不同的碳同位素组成(<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比率)。因此在测定CO<sub>2</sub>浓度的同时，通过测定碳同位素比率，便可得出其变化原因的情报。通常CO<sub>2</sub>浓度增加时，<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比率则减少，反之<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比率就增加，浓度没有改变而同位素比率发生变化，大概是由大气与海洋间的交换引起的。

**结束语** 1958年以来连续观测到的大气中CO<sub>2</sub>浓度增加，本质上是由与累积释放量对应的大气残留率，大致每30年保留60%所决定的。它与每年的释放量无关，我们假设：大气残留率是大致不变的，这就是地球本身对于自然的调节力。今后的CO<sub>2</sub>对策和模式的研究就以这种假设为前提。但对未来趋势的研究，科学数据尚不足，因此充分的基础研究的积累是非常必要的。

当把时间尺度定为 $10^3 \sim 10^4$ 年时，海洋肯定成为大气CO<sub>2</sub>最主要的调节者，但在100年内把大气中CO<sub>2</sub>的浓度提高25%（从280ppm增加到345ppm）那样剧烈变化，海洋有多大的补偿能力？这是很成问题的。人类对于已经开始的未经实验计划的地球物理实验恶果，必须承担责任。

张明秀译自《公害与对策》，1989，No 5，杨郁华校