



国际电气工程先进技术译丛



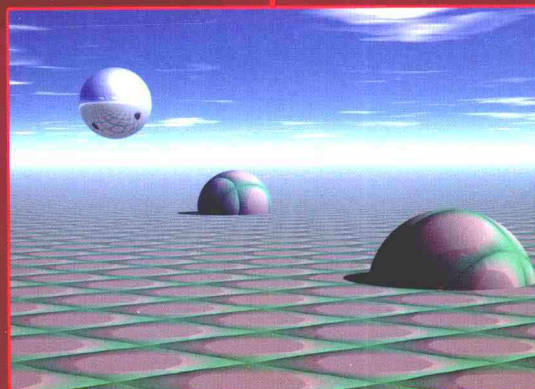
碳捕获与封存

Carbon Capture and Storage

(英) Stephen A. Rackley 著
李月 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

碳捕获与封存

(英) Stephen A. Rackley 著
李 月 译



机械工业出版社

译者序

最近 10 多年来，随着科学认识的深入和全球的持续关注，气候变化问题已成为全球首要的环境问题和最主要的国际议题之一。其核心问题就是如何控制温室气体的浓度，以使其稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上。为解决这个问题，国际上对多种新技术和新观点展开了研究。其中，碳捕获与封存 (CCS) 作为一类专注于研究和开发二氧化碳 (CO_2) 的分离、捕获、运输和封存的技术，受到了发达国家学术界与工业界的广泛关注。

碳捕获与封存为协调化石能源的使用与减缓气候变化的政策目标之间的冲突提供了可能。大量的 CO_2 可以通过在发电厂等大型排放源上配套安装碳捕获与封存装置而收集起来。从全球来看，电力行业的排放就占到人为 CO_2 排放总量的 40%。从国际能源署对有着大量煤炭资源且经济增长迅速的发展中国家未来电力需求的预测来看，在电力行业发展碳捕获技术显得尤其重要 (IEA 2002a)。

现在全球每年来自化石燃料燃烧所产生的温室气体排放总量在 60 ~ 65 亿 t 左右。如果要实质性地减少人为 CO_2 排放对全球气候稳定性的影响，就意味着每年至少需要通过技术手段减少 10 亿 t 的 CO_2 排放。然而，现有的碳捕获与封存项目每年所带来的减排，预计不到这个数字的 1/1000。这些现有项目的规模很小，还主要处于试验与示范阶段；不仅如此，碳捕获与封存领域的大多数现有技术都还处于不同的试验和示范阶段。其中又以试验阶段为主，只有一小部分进入了示范阶段，这意味着仍需要大量的进一步研发工作来提高技术水平，并降低成本。

本书的目的是为碳捕获与封存领域处于不同阶段、不同类别的技术进行一个全面的技术性综述。从本书的结构来看，它包括以下五个部分：碳捕获与封存的基础知识、捕获、封存与监测、运输，以及相关的信息资源。

Stephen A. Rackley 博士毕业于剑桥大学，并在过去的 26 年中一直在能源行业工作。他所工作过的一些领域，如在岩石圈寻找、评估、监测和确认地面下的存储空间等，是现在最为成熟的碳捕获与封存方式所需要的一些关键技术。通过这本书，作者希望为气候相关领域的决策者提供碳捕获与封存问题上必要的技术背景，并鼓励未来一代的学生和工程师致力于解决 21 世纪最重要的技术挑战。

最近几年，通过国际合作，我国的电力企业也开始对应用于发电厂的碳捕获与封存进行研究和小规模示范。本书对碳捕获与封存领域的全面概括，尤其是对重要的新技术和发展中的技术的介绍，可以为我国的技术与工程管理人员提供重要的基础信息，同时也是能源相关专业高年级学生了解碳捕获与封存的入门

书籍。

需要说明的是，本书是译者在尽量尊重原书内容的基础上翻译的，书中观点并不代表译者及其所在工作单位的观点，也不代表出版单位的观点，这点请广大读者注意。由于翻译时间仓促，同时又限于译者对原书理解可能存在的偏差，加上这是一本全面、细致、涉及多个学科和专业领域的基础参考书，而且本书的主题也是一个正在不断变化和改进的新主题，所以虽然译者在翻译的过程中尽可能地按照各个专业领域的习惯用法对各种术语进行翻译，但可能仍存在一些偏颇或疏漏，恳请广大读者和同行多多批评指正。

译 者

原 书 序

本书赖以成长的种子是由理查德·布兰森爵士和美国前副总统阿尔·戈尔在2007年2月9日发起的“维珍地球挑战”播种的。这个挑战的目的是鼓励开发能够从大气中去除相当体积的人为排放的温室气体，并对全球气候的稳定带来实质性影响的商业可行的新型技术、工艺和方法。

化石燃料燃烧带来的排放量为 $6.0 \sim 6.5 \text{ Gt-C/年}$ ($1 \text{ Gt-C} = 10^9 \text{ t-C}$)，给气候稳定带来实质性影响意味着推广的潜力需要达到 1 Gt-C/年 的规模，这比现在正处于运行中的任何项目都大上千倍。虽然这些规模看上去很庞大，但人为排放在自然通量面前相形见绌，例如陆地光合作用的规模约为 120 Gt-C/年 ，而海洋的吸收和释放约为 90 Gt-C/年 。

一系列范围广泛的碳捕获与封存 (CCS) 技术现在正处于研究、开发和示范的不同阶段。虽然有几项技术已经达到推广阶段，但许多仍然需要大量的进一步开发工作，以提高技术能力并降低成本。尽管领先者已经浮现，但很可能 CCS 的长期潜力需要通过应用不同技术的广泛组合来实现。这些技术的范围既包括现在最受瞩目的技术——以溶剂为基础的燃煤电厂碳捕获和地质封存——也包括燃烧前对燃料进行去碳化，对微生物群落或海洋肥力这样的生态因素进行操纵，以提高土壤和海洋中的碳存量，以及许多其他技术。

本书的主要目的是通过为处于各个成熟阶段的技术提供一个全面的、技术性的，但非专业视角的概述，以期望为决策者提供技术背景并鼓励未来一代的学生和年轻的工程师解决 21 世纪最为重要的技术挑战，从而为这个目标的推进做出些许贡献。

本书包括五个部分，分别介绍基础知识、捕获、封存与监测、运输以及信息资源。第 1 部分的三章介绍了一些基础知识。第 1 章描述了全球碳循环，并概括了人为二氧化碳排放对碳通量和碳汇的扰动影响。第 2 章以碳排放的主要工业过程为起点，给出了 CCS 技术的简要初步概括。由于来自发电厂的排放捕获将是早期 CCS 推广的主要目标，因此第 3 章对发电技术进行了相当全面的介绍。这里的重点是在 CCS 技术成熟之后有可能与 CCS 相结合的现在的先进技术和正处于开发中的系统。

在建立起基础之后，第 2 部分对碳捕获技术进行了一个更为详细的描述。前两章是从工业角度着笔的，其中第 4 章是关于电力行业，第 5 章是其他行业；而接下来的五章主要是从技术角度出发，涵盖了吸收、吸附、膜、低温和矿物质碳化

技术。

第3部分接下来应对被捕获的CO₂的封存和相关的监测需求,涵盖了地质封存(第11章)、海洋封存(第12章)和在陆地生态系统中的封存(第13章)。第3部分的最后一章描述了以可以为全球的CCS目标做出显著贡献的方式增加CO₂工业应用的机会,例如低碳水泥和生物燃料的生产。

第4部分讨论的是在捕获和封存地点之间通过管道设施或海上运输对CO₂进行运输的问题。

本书在第5部分以信息资源概要(包括单位和转换因子)、关键缩略语列表和一些书中提到的关键技术名词的术语表作结。

虽然本书的焦点是CCS的技术方面,但许多其他因素也在决定CCS技术最终在多大程度上得到推广的过程中起到一定的作用,其中首要的因素就是成本。除了在一些地方简要提到一些CCS技术现在的估计或目标成本,本书避免对各种讨论到的技术的推广成本进行任何分析。每个CCS项目的资本和运行成本以及经济性将会高度依赖于项目自身的情况,并且汇率的波动也会使任何一般性分析进一步复杂化。通过进一步的R&D(研究与开发)工作的成果和从早期示范项目中的学习,我们可以预期CCS技术的成本和能源需求在未来会下降。这些提高的范围和时间以及它们对捕获总成本的影响是高度不确定的,因此现在的成本在实际的和相对远的未来的CCS推广前景或成本方面是一个价值很小的参照。

本书的多个章节都从专注于本书描述的一系列范围广泛的技术领域的许多科学家和其他专业人士的评审中获益。我特别需要感谢Dr. John Benemann (Benemann Associates), Dr. Somayeh Goodarzi (加拿大卡尔加里大学), Rob 和 Karin Lavoie (Calpetra Research & Consulting), Dr. Klaus Lorenz (美国俄亥俄州立大学), Dr. Antonie Oosterkamp (Research Foundation Polytex), Dr. Edward Peltzer (美国蒙特利湾水族馆研究所), Prof. James Ritter (美国南卡罗来纳大学), Prof. Anja Schuster (德国斯图加特大学), Dr. Takahisa Yokoyaka (日本电力工业中央研究所[CRIEPI]), Prof. Ron Zevenhoven (芬兰埃博学术大学)。他们慷慨提供的关键意见已经反映在书中;本书仍然存在的缺点、错误和遗漏的责任都归于作者本人。非常欢迎来自读者的任何评价、建议或其他反馈,请把它们发送到 ccst2010@gmail.com。

我很高兴与 Elsevier 的团队合作一起使本书成为现实,我还要感谢 Ken McCombs 和 Irene Hosey——他们从本书的概念到完成过程都提供了指导和支持——以及由能干的 Maria Alonso 领导的制作小组和小组成员 Donald Whitehead (MPS Content Services) 以及 Anne McGee。

最后感谢 Serge、Brin 和 Jimmy, 没有他们的远见, 这个项目将会有大得多的

挑战。

自从 1990 年联合国政府间气候变化专门委员会发表其第一份评估综合报告之后的 20 年来，随着证据和理解的日益积累，委员会对不确定性的谨慎语言逐渐加强，以致到第四份评估报告时已经能够以很高的可信度声称“自 1750 年以来，人类活动的净效应是全球变暖的原因之一。自 20 世纪中期以来，所观测到的全球平均温度上升非常有可能是由于所观测到的人为排放温室气体浓度的上升”（IPCC AR4, 2007）。

展望即将在 2014 年发布的第五份评估报告，随着人类活动的气候影响处于预测范围上限的新证据日益积累，我们面前的任务就是确保在我们能够做出改变的有限机会窗口关上之前，我们没有终结……

“这个地球已经被破坏！我们需要找到一个新的。”（Fey, T (2007). Greenzo, 30Rock, 2 (5)）。

Stephen A. Rackley

目 录

译者序
原书序

第1部分 简介与综述	1
第1章 简介	1
1.1 碳循环	3
1.2 减缓大气中碳存量的增长	8
1.3 技术创新的过程	10
1.4 参考文献与资源	14
第2章 碳捕获与封存的综述	16
2.1 碳捕获	16
2.2 碳封存	20
2.3 参考文献与资源	24
第3章 发电基础知识	25
3.1 物理与化学基础	25
3.2 化石能源电厂	37
3.3 联合循环发电	48
3.4 发电技术的未来发展趋势	53
3.5 参考文献与资源	55
第2部分 碳捕获技术	57
第4章 发电过程中的碳捕获	57
4.1 简介	57
4.2 燃烧前的碳捕获	58
4.3 燃烧后的碳捕获	61
4.4 富氧燃烧捕获	64
4.5 化学链燃烧中的捕获系统	67
4.6 已配套碳捕获技术的电厂和对电厂进行改造	71

4.7 通向零排放电厂之路.....	75
4.8 参考文献与资源.....	79
第5章 工业生产过程中的碳捕获	81
5.1 水泥生产.....	81
5.2 钢铁生产.....	83
5.3 炼油.....	84
5.4 天然气处理.....	86
5.5 参考文献与资源.....	86
第6章 吸收性捕获系统	88
6.1 化学与物理基础.....	88
6.2 吸收方式在燃烧后捕获中的应用.....	93
6.3 碳吸收技术的 RD&D 现状	100
6.4 参考文献与资源	111
第7章 吸附性捕获系统.....	113
7.1 物理与化学基础	113
7.2 吸附工艺的应用	122
7.3 吸附技术的 RD&D 现状	127
7.4 参考文献与资源	134
第8章 膜分离系统.....	136
8.1 物理与化学基础	136
8.2 膜的配置、制备和组件的制造	148
8.3 膜技术的 RD&D 现状	152
8.4 膜吸附在燃烧前捕获的应用	155
8.5 膜和分子筛技术在富氧燃烧中的应用	157
8.6 膜技术在燃烧后 CO ₂ 分离中的应用	159
8.7 膜技术在天然气处理中的应用	161
8.8 参考文献与资源	164
第9章 低温和蒸馏系统.....	165
9.1 物理基础	165
9.2 蒸馏塔的配置与操作	166

9.3	富氧燃烧前的低温氧气生产	169
9.4	CO ₂ -CH ₄ 分离中的瑞安-霍姆斯工艺	171
9.5	在低温和蒸馏技术方面的 RD&D 现状	173
9.6	参考文献与资源	174
第 10 章	矿物质碳化	175
10.1	物理与化学基础	175
10.2	技术发展现状	180
10.3	示范推广的前景	187
10.4	参考文献与资源	190
第 3 部分	封存与监测技术	192
第 11 章	地质封存	192
11.1	简介	192
11.2	地质与工程基础	192
11.3	提高原油采收率	204
11.4	盐碱含水层封存	210
11.5	其他的地质封存方式	219
11.6	参考文献与资源	223
第 12 章	海洋封存	225
12.1	简介	225
12.2	物理、化学和生物基础	225
12.3	CO ₂ 直接注入	232
12.4	化学固碳	236
12.5	生物固碳	237
12.6	参考文献与资源	240
第 13 章	陆地生态系统封存	243
13.1	简介	243
13.2	生物与化学基础	244
13.3	陆地碳封存的方式	252
13.4	陆地封存的温室气体全周期核算	260
13.5	陆地封存的 R&D 现状	260
13.6	参考文献与资源	265

第 14 章 其他固碳和利用途径	268
14.1 增加工业利用	268
14.2 海藻生物燃料生产	271
14.3 参考文献与资源	276
第 4 部分 CO₂ 的运输	278
第 15 章 CO₂ 的运输	278
15.1 管道运输	279
15.2 海上运输	286
15.3 参考文献与资源	288
第 5 部分 碳捕获与封存信息资源	290
第 16 章 更多的信息来源	290
16.1 国家组织、国际组织和项目	290
16.2 按技术领域划分的资源	292
16.3 CCS 相关的网络刊物和新闻简报	295
第 17 章 单位、缩写和术语表	296
17.1 CCS 单位和转换因子	296
17.2 CCS 相关的缩写	297
17.3 CCS 技术的术语表	305

第 1 部分 简介与综述

第 1 章 简介

地球上的化石燃料资源——预计总量为 4000 ~ 6000Gt (1Gt = 10 亿 t) 碳——是从数百万年前至今的生物和地理过程的产物。在地质年代, 这些资源中封存的碳原本是一个更年轻的地球大气中的成分。在 3.6 亿年前的石炭纪初期, 这个年轻的地球大气中含有约 1500ppm[⊖] (part per million, 以百万分之一作单位) 的 CO₂。当时, 地球上最早的原始森林的进化刚开始生物地质封存这个漫长的过程。

自从 1750 年左右工业时代到来, 尤其是自从内燃机发明以来, 这些资源总体积的 5% 已经被燃烧, 预计约 280Gt 的碳又被以 CO₂ 的形式释放回大气中。同期, 另有约 150Gt 的碳由于土地用途的改变而从土壤碳库中被释放到大气中。大气、陆地和海洋的碳循环分散了这些大气排放中很大一部分, 通过海洋溶解和土壤中长久存在的碳库把 CO₂ 封存了起来。自从 1750 年以来, 大气中的 CO₂ 浓度已经从 280ppm 增加到 2000 年的 368ppm 和 2010 年的约 388ppm, 这是过去 650000 年中的最高水平, 甚至是过去 2000 万年都不太“可能”被超越过的水平, 在这里, “可能 (likely)” 反映的是联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的判断, 66% ~ 90% 的可能性。

大气中 CO₂ 浓度的这种增加影响了地球-大气系统中入射和返回的能量平衡, CO₂ 成为最为主要的由人类活动产生的温室气体 (Greenhouse Gas, GHG)。在第 4 次评估综合报告 (Fourth Assessment Report, AR4) 中, IPCC 的结论认为全球平均的地面温度在 20 世纪已经上升了 0.74℃ ± 0.18℃ (见图 1-1), 并且认为“自 20 世纪中期以来, 绝大多数所观察到的全球平均温度升高现象, 很可能 (> 90% 的可能性) 都是由人类活动带来的温室气体浓度增加引起的。”

尽管人为的 CO₂ 排放和自然碳通量——例如, 光合作用和土壤呼吸的碳通量为每年约 60Gt 碳, 比目前化石燃料燃烧的排放量大 10 倍——相比相对较小, 但人为排放的时间单位是以数百年而非数百万年来计算。人为的改变也降低了某些气候回馈机制的有效性, 例如, 对土地使用和土地管理活动的改变降低了土壤在更高

⊖ 1ppm = 1 × 10⁻⁶。

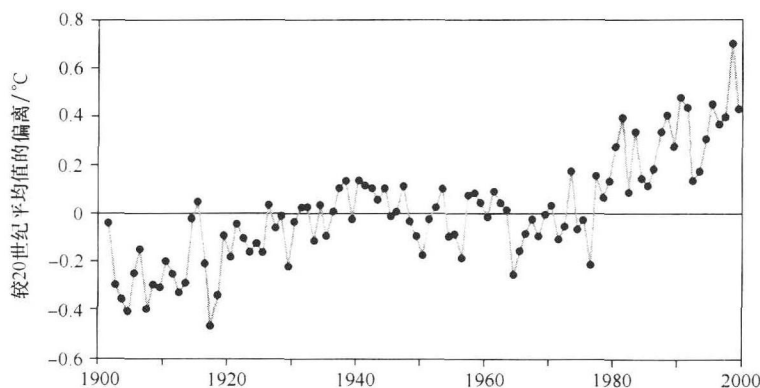


图 1-1 20 世纪地球表面温度的波动 (IPCC 数据)

的大气 CO_2 浓度下建立土壤碳存量的能力，海洋酸化也降低了海洋从大气中吸收额外的 CO_2 的能力。

现代经济的能源消耗在继续增加，一些情景分析预测全球的能源需求在 2010 ~ 2050 年间会增加一倍。化石能源现在满足全球能源需求的 85%，并且以同样的比例为全球的发电提供燃料，而且它们在能源供应中的主导地位会在 21 世纪甚至更长的时间里延续。在缺少减缓排放措施的情况下，化石能源的排放会继续增加大气中的 CO_2 浓度，导致进一步的变暖，并诱发全球气候的许多变化。即便 CO_2 浓度可以在 2010 年之前稳定下来，变暖和其他的气候效应预期仍将在几个世纪内继续，这是由于气候过程具有很长的时间周期。一系列有关稳定情景的气候预测发出了在未来几个世纪气候会变暖 $2 \sim 9^\circ\text{C}$ 的警告，并且最近的结果更靠近这个范围的上限。

尽管仍然存在许多不确定性，但对急需 CO_2 减排措施以使长期的气候变化最小化这个问题提出严重怀疑的空间很小。随着以低碳或零碳方案替代化石燃料使用的研究与开发的继续，稳定 CO_2 浓度的迫切需求意味着对排放到大气中的碳进行捕获与封存的措施可以在通向低碳社会的转型阶段发挥重要作用。

在碳捕获与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 这个领域，大量的技术现在处于研究与开发阶段，并且越来越多的示范项目已经开工或处于规划之中。其中一部分技术已经进入应用阶段，当地的情况或项目的某些具体特点使得它们在经济上可行，但大多数技术仍然需要进一步的开发以提高技术水平并降低成本。尽管以相当的可信程度来识别最有可能获得成效的技术是可能的，但以 CCS 实现减排的长期总体潜力有可能需要通过应用大范围的不同技术方案来实现。

本章接下来的内容为这个挑战提供了相关的背景。第 1 节将讨论组成全球碳循环的碳存量和碳通量。现有的 CCS 先驱技术通过从大型排放源中在排放前捕获

CO₂来给人为排放予以“直接打击”，而任何可以限止增加碳存量的碳通量或促进减少碳存量的碳通量的方式都可以降低大气中的碳存量。因此，对这些碳存量和碳通量的理解是一个关键的基础知识。

本章的最后将描述技术创新的过程。这里介绍的概念和定义将贯穿本书，以使各种技术和项目在从研发到商业应用的技术发展整个生命周期上进行定位。

1.1 碳循环

存在于大气、生物圈、土壤、岩石和海洋中的碳存量与一系列复杂的自然和人类生物地球化学过程相互关联，它们共同组成了所谓的碳循环。图 1-2 所示为组成这个循环的碳存量（粗体，Gt-C 为单位）和碳通量（斜体，以 Gt-C/年为单位）。

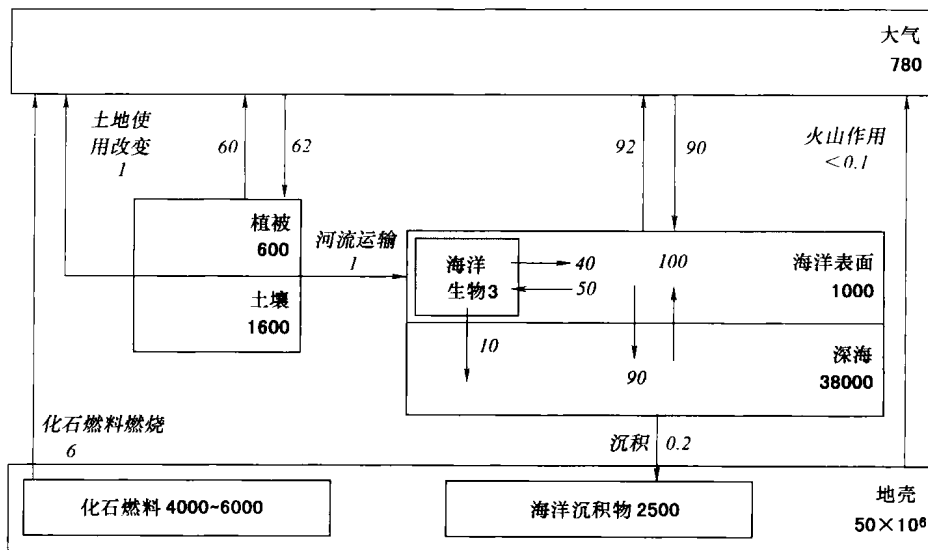


图 1-2 碳循环中的碳存量和碳通量（2008 年估计值）

1.1.1 碳存量

下面将介绍与全球碳循环相关的主要碳存量。

大气中的碳存量

大气中的碳存量几乎完全由 CO₂ 组成，CO₂ 浓度约为 388ppm（2010 年），或以体积来算占 0.04%。如上面提到的，由于化石燃料燃烧以及土地使用和土地管理方式的改变所带来的净排放，这个碳存量自前工业化时代以来已经增加了几乎

40%。剩余的大气碳存量包括浓度约为 1.8ppm 的甲烷 (CH_4) 和微量的一氧化碳 (CO) 以及人为排放的氯氟烃 (CFCs)。

对 CO_2 浓度的详细测量开始于 1957 年 12 月, 由查尔斯·基林 (Charles Keeling) 在夏威夷的美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 莫纳罗亚火山气象观测站 (Mauna Loa Observatory) 根据第一个完整年度的测量结果得出 315ppm 的平均值。从那时开始建立的 CO_2 浓度增加曲线被叫做基林曲线, 过去 20 年来自莫纳罗亚火山的数据如图 1-3 所示。

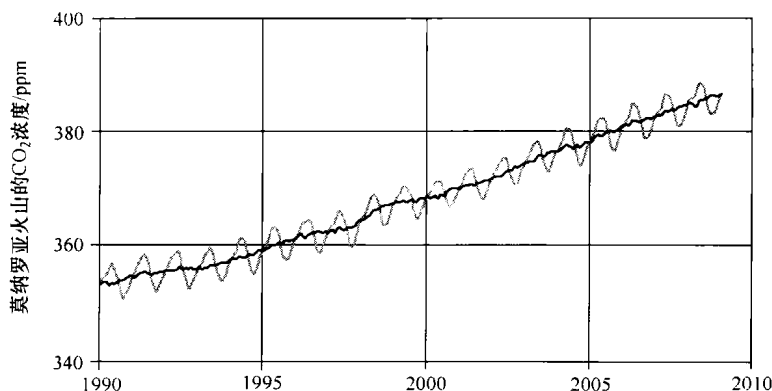


图 1-3 莫纳罗亚火山气象观测站的 CO_2 浓度 (数据来源: NOAA, 地球系统研究实验室, 全球监测部门)

图 1-4 所示为 2000 ~ 2008 年每年在不断上升的趋势中的周期循环以及这期间的平均值。这个循环与北半球的季节同步。在北半球, 由于 5 月至 9 月间的光合作用, CO_2 浓度比年度平均值低约 3.5ppm, 而在 10 月至次年 4 月由于生物质分解的结果, CO_2 浓度以相似的幅度反弹回去。

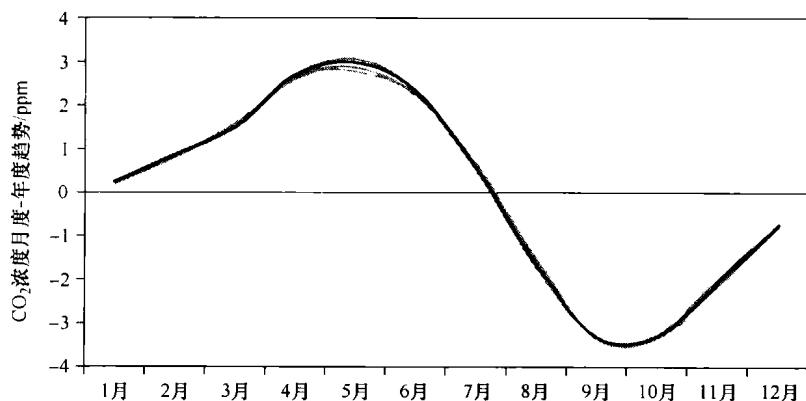


图 1-4 2000 ~ 2008 年年度 CO_2 浓度循环 (数据来源: 同图 1-3)

在莫纳罗亚火山的这个年度 CO_2 浓度的振幅已经从 20 世纪 50 年代末的约 5.7ppm 增加到 2008 年之前 5 年的约 6.4ppm。这被认为是由于 CO_2 浓度和温度上升，因而北半球陆地生态系统初级光合作用增加的结果。

大气中的碳存量总量在 CO_2 浓度为 388ppm 时为 780Gt， CO_2 浓度每年增加约 1.7ppm，意味着碳存量每年增加约 3.5Gt。

生物圈和土壤中的碳存量

陆地上的碳存量预计为 2200Gt，其中 600Gt 以活着的生物质的形式存在，1600Gt 以有机碳的形式存在于土壤和沉积物中。由于土地使用和土地管理方式的改变——其中毁林、将草地变成农业用地以及集约式农业耕作是最主要的因素，这个存量自前工业时代，尤其是 19 世纪中期以来已经减少了约 10%。

如表 1-1 所示，土壤中的碳存量可以根据碳沉淀到土壤中的时间进一步分类。碳的来源既有植物和动物残骸（它们将会在一个 1 ~ 10 年的典型时间范围内被分解，然后通过呼吸作用排放出来），也有惰性碳（它很难接触到有机过程，因此直到被水或空气搬运之前会一直存在于土壤中）。这些过程将在第 13 章进一步讨论。

表 1-1 土壤碳存量、组成和寿命

组 成	寿 命	碳存量/Gt
植物和动物残骸	<10 年	350
改性土壤碳	10 ~ 1000 年	1100
惰性碳	>1000 年	150
总计		1600

海洋中的碳存量

海洋碳存量约为 39000Gt，其中超过 90% 存在于碳酸氢根离子 (HCO_3^-) 中，如表 1-2 所示。此外，约 2500Gt 存在于海相碳酸盐岩沉积中，它们随着地质时代的演变会逐渐被转变成沉积岩。在海洋中溶解的 CO_2 存量中，约 120Gt 是人为排放的，并且每年预计以 2Gt 的速率增加。

表 1-2 海洋碳存量

组 成	碳存量/Gt
碳酸氢根离子	36000
碳酸根离子	1300
溶解 CO_2	740
溶解有机碳	<700
海洋生物质	<10
总计	约 39000

在海洋中, 3 个关键过程——生物泵、溶解度泵和热盐环流——影响了碳在有机和无机部分的分布、它的运输以及最终在沉积物中的沉积。这些过程在第 12 章将进一步描述。

地壳中的碳存量

地球的外壳, 即地壳的表层部分, 是最终的地质碳汇之处, 它预计在沉积岩中存有 $5 \times 10^7 \text{ Gt}$, 其中的 20% 是以有机碳的形式存在的, 其余是以石灰石的形式存在。化石燃料——煤、石油和天然气——总共占到 $4000 \sim 6000 \text{ Gt}$, 这大约是沉积岩中现有有机碳总量的 0.05%。

1.1.2 碳通量

这些碳存量通过一个网状的相互关联的自然过程受到碳通量持续不断的影响。此外, 人类活动也引入了新的碳通量, 而这些新增碳通量所带来的影响反过来又通过各种反馈机制改变了一些自然的碳通量。到目前为止, 这些效应的净回馈为负值, 人为排放的 CO_2 只有约 45% 仍然存在于大气中。

大气↔海洋碳通量

由于大气和海洋表面的海水的 CO_2 分压之间存在着差值, 因此大气和海洋之间会发生 CO_2 交换。据估计, 每年的交换量约为 90 Gt 。这种碳通量由两个关键的过程所控制: 全球海洋环流系统, 它在一个 $500 \sim 1000$ 年的时间周期内交换海洋表层和深层的海水; 海洋表面海水的地球化学特征, 尤其是通过离子反应以及沉降去除碳酸根离子的过程 (碳酸盐缓冲, 参见术语表)。

由于形成碳酸氢根离子的离子反应过程, 溶解 $[\text{CO}_2]$ 的增加会降低碳酸根离子的浓度 ($[\text{CO}_3^{2-}]$):



和



以 $[\text{HCO}_3^-] + 2 \times [\text{CO}_3^{2-}]$ 衡量的海洋碱浓度在这个反应中得到了维持, 因为一个碳酸根离子被转化为两个碳酸氢根离子。然而, $[\text{CO}_3^{2-}]$ 的下降意味着用于与额外的溶解 CO_2 进行反应的离子变少了, 这影响了 CO_2 在海水中的进一步溶解, 并且由于反应式 (1-1) 的结果, 海洋的酸度会增加。

图 1-3 所示为大气 CO_2 浓度的增加导致海洋中 CO_2 的溶解速率加快, 这会以每年 2 Gt 的速率减少大气中的碳存量, 大致相当于 1990 ~ 2005 年间人为排放量的 $1/3$ 。这一额外溶解量导致海洋表面酸度增加, 并且这些海水中的碳酸盐缓冲已经被耗尽了。如上文所述, 这将限制海洋在未来大气 CO_2 浓度增加时更多地溶解 CO_2 的能力。

海洋为稳定大气 CO_2 浓度提供了一个动作缓慢的缓冲, 并且任何大气波动都在一个若干世纪的时间范围内通过海洋的溶解被驱散。这如图 1-5 所示, 它展示了海