



# 第一章

## 如何认知碳循环

伴随“碳达峰”“碳中和”国家战略实施，碳中和经济学已然成为碳中和相关专业人才培养体系不可或缺的重要一环，但如何基于不同专业背景、不同人才培养层次，开展碳中和经济学教学，仍是一个需要认真思考的问题。本章首先阐述“碳”的基本知识，包括碳的内涵、碳的分布、碳的用途等。在此基础上，介绍碳循环基本内涵、属性特征、演化理论及碳循环过程等，同时解析不同专业学科视角下对碳循环的科学认知。最后，探讨碳循环失衡原因及其对诸多方面的重要影响，这也是考虑碳循环是科学认知碳中和、学习了解碳中和经济学的必要知识储备。

## 第一节 “碳”的基本知识

地球给人类创造了“浑然天成”且相对适宜的自然生态环境，其中适合人类生存的温度、舒适气候条件是人类得以生存繁衍、代代不息的最基本条件。然而，地球本身物质新陈代谢和人类生命自身的周期循环也给人类生存和发展提供了一种微妙的状态平衡，这种人类永续发展的状态平衡与一种碳元素的存在关系非常密切。

### 一、碳

碳是一种非金属元素，位于化学元素周期表的第二周期ⅣA族，其原子序数是6，相对原子质量为12.01。碳是地球上最常见的化学元素之一，英文名称 Carbon。碳以多种物质形式广泛存在于大气层、地球地表及地壳之中。在常温状态下，碳是一种固体，且具有化学稳定性，其中金刚石和石墨很早就被人们认识和利用，碳的一系列化合物——有机物更是地球生命体的根本。

根据科学资料记载，原始地球本不富含碳元素，但在漫长的地球形态演化过程中，碳元素以尘埃、颗粒、天体的形式被地球捕获，成为地球物质复合体的一部分。世界权威科学统计数据库 Statista 公布资料的保守估计<sup>①</sup>，地球碳储量<sup>②</sup>超过470 000亿吨，此处未考虑大陆地壳和上地幔中的碳储量，其中大气中的二氧化碳约为8 600亿吨，植物和土壤中的有机碳约为25 000亿吨，海洋中的溶解碳和沉积碳超过400 000亿吨。其中，如果不考虑地壳和地幔中短期内难以被利用的碳，绝大部分的碳元素都存在于水圈中（86%），其次是陆地生态系统（9%）和岩石圈（3%），如图1-1所示。

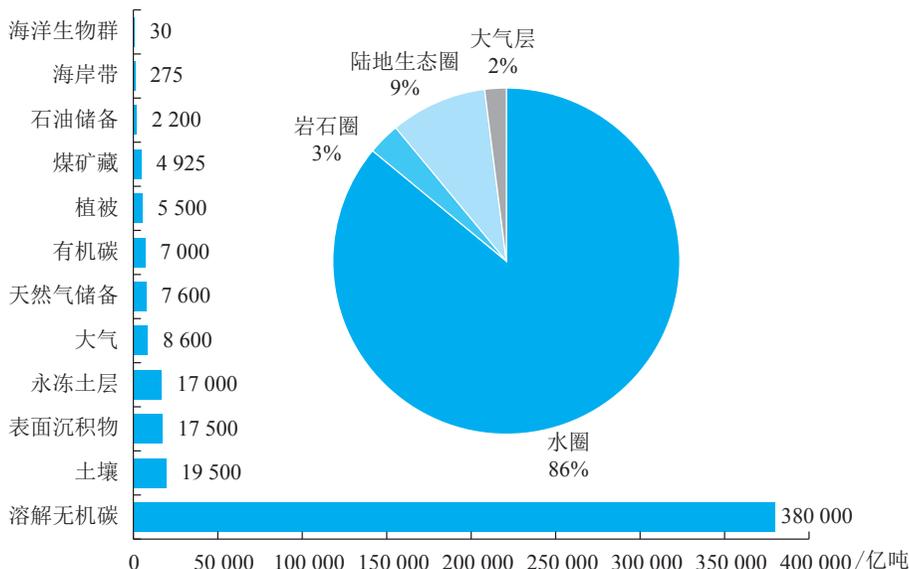


图 1-1 全球碳储量及类型（2010—2019 年平均数据）

① 尽管目前没有官方统计数据，学术界认为全球碳储量的理论估计值远超这个数字。根据 Statista 估计，如果考虑岩石圈（大陆地壳和上地幔）和大气层之间所有的碳，全球碳储量将超过 1.2 万亿吨。

② 碳储量 (carbon stock) 指碳的储备量，通常指一个碳储存系统（森林、海洋、土地等）中碳的数量。

自然界中，存在单质碳和碳化合物两种形式，而人类使用的更多的是碳化合物，其中人们目前赖以发展的化石燃料基本为含碳化合物。将含碳化合物燃烧时，碳的形式会发生变化，一部分会仍以固态形式存在，另一部分会以二氧化碳、一氧化碳或其他气态碳化合物形式存在。

## 二、碳的分布

从全球的角度讲，碳元素以不同物质赋存形态分布于地球各圈层若干主要的碳储库<sup>①</sup>中，不同碳储库的碳储量以及碳密度<sup>②</sup>差异很大，如图 1-2 所示。



图 1-2 地表系统的碳储库示意图

### (一) 大气圈

大气圈是指因地球的引力而聚集在地表周围的气体圈层，同时这也是地球各圈层中最活泼的圈层之一。大气圈中的碳物质主要以两种碳化合物气体形式存在，即二氧化碳和甲烷。

碳储库中的碳物质，以不同的方式、途径进入大气圈，具体包括：

(1) 植物和动物的呼吸作用——此过程消耗氧气，有机分子（如葡萄糖）被分解并释放出能量，产物则为二氧化碳。

(2) 动植物尸体的腐败——动植物死亡后，细菌、真菌等微生物会将它们的尸体分解，其中的含碳化合物也发生降解，有氧条件下产生二氧化碳，无氧条件下产生甲烷。

(3) 有机材料的燃烧——最值得关注的是煤炭、石油、天然气等化石燃料的燃烧，这个过程将曾经深埋于地下的化石燃料中的“碳”最终释放出来。

(4) 海水中溶解的二氧化碳重新回到大气。

(5) 火山活动等释放的气体，主要包括水蒸气、二氧化碳和二氧化硫。

### (二) 水圈

水圈是指由地球表面上下，以液态、气体和固态的水形成一个几乎连续但不规则的圈

① 碳储库是指在碳循环过程中，地球系统各个所存储碳的部分，包括地质碳储库、海洋碳储库、土壤碳储库、生态系统碳储库等。

② 碳密度即为单位面积的碳储量，大多文献碳密度指有机碳含量，或以单位经济产出碳排放量作为衡量指标。

层，其中水圈主体是地球大洋，占全球面积约 71%。水圈中的水，上界可达大气对流层顶部，下界至深层地下水的下限，包括大气中的水汽、地表水、土壤水、地下水和生物体内的水等。

二氧化碳可直接从大气中溶解到水体中，并随着雨滴从大气中落下而溶解在降水中。大气中的二氧化碳溶解在水中生成碳酸，碳酸可进一步电离生成氢离子和碳酸氢根离子化合物。在广袤的海洋中，大部分碳以碳酸氢根离子的形式存在。溶解在海水中的二氧化碳可被海洋生物利用，进入生物圈，亦可在一定条件下重返大气圈。

通常大洋碳储库被分为表层和深层两个储库。

(1) 表层碳库。表层海水与大气圈存在活跃的交流，广阔的大洋水体中溶解了大量的二氧化碳，浮游生物可通过制造自身的骨骼壳体而将碳元素固定下来，即表层碳库。表层碳储库较之深海储库储量较小，但它的重要性不容小觑，它不仅是海—气相互作用的主要场所，还是碳进入深海碳库的通道。

(2) 深海碳库。深海碳库得益于大洋表层水的“泵”作用，即生物泵——海水表层溶解的二氧化碳被浮游生物利用制造成有机质和碳酸钙质的骨骼，生物死亡后沉到海底进入海洋沉积，退出海洋和大气的碳循环；碳酸盐泵——表层海水对碳酸盐过饱和，不断地有碳酸盐矿物晶体形成，在沉入深海的过程中随着压力的升高和温度的降低逐渐溶解，至碳酸盐补偿深度 (CCD)<sup>①</sup> 全部消失。资料显示，深层碳库的有机碳约为 38 000 亿吨，而无机碳则约为 39 000 亿吨，深海碳库碳储量相当于全球陆地和大气中有机和无机碳储量的两倍以上。

### (三) 陆地生物圈

陆地上的生物圈是地球所有生物体及其生存环境组成的地球生态系统，指陆地表面及其下方一定深度内的所有植物、动物及微生物等。陆地生物圈核心部分厚度为 20 ~ 30 千米，但有正常生命活动能力的生物不是遍布生物圈上下各处，而是集中生存于距离地球表面不远的范围内。这个部分也是地球上最大的生态系统，更是人类诞生和生存的基础。

陆地生物圈是二氧化碳主要通过光合作用从大气层中去除，并转化进入陆地生物圈。2000 年联合国有关机构发表报告估计，全球陆地生态系统碳储量约 24 770 亿吨，其中植被 4 660 亿吨、土壤 20 110 亿吨。值得一提的是，森林生态系统是陆地生态系统中最大的碳储库，森林植被的碳储量约占全球植被的 77%，森林土壤的碳储量约占全球土壤的 39%，而单位面积的森林储存的碳是农田的 20 ~ 100 倍。

### (四) 岩石圈

岩石圈是地球上部相对于软流圈而言的坚硬的岩石圈层，包括地壳的全部和上地幔的顶部，主要由花岗质岩、玄武质岩和超基性岩组成。

<sup>①</sup> 碳酸盐补偿深度 (carbonate compensation depth) 是指海洋中碳酸钙 (生物钙质壳的主要组分) 输入海底补给速率与溶解速率相等的深度面，也称碳酸钙补偿深度。

在岩石圈中，碳以碳酸钙的形式存在于石灰石、大理石、白垩等天然矿物中。储量最大的岩石圈储库包括大陆碳酸盐岩、海床碳酸盐岩、有机碳油母质及地幔物质，与其他圈层碳交换较少。地幔中有大量溶解于橄榄岩等熔岩里的碳，“地下海洋”看似波澜不惊，一旦发生大规模的岩浆喷发，蕴藏于地幔中的碳酸盐类将以二氧化碳的形式进入地表的大气与海洋，其所造成温室效应的规模将远超过我们的想象。

### 三、碳的用途

人类对碳的认识和利用可追溯至远古时候人类对火的使用。从北京周口店所发掘的距今约 50 万年的“北京人”化石中发现，当时的人类已经能进行生活、狩猎和使用火。从化石遗迹中的燃烧灰烬中发现，“北京人”已经懂得使用含碳有机物作为燃料。

在自然界，90% 以上的各类化合物中都含有碳元素，碳存在的形式多种多样，且广泛分布在地球各个领域。在现代社会，含碳元素的物质在我们的日常生活中更是非常重要的矿物资源，扮演着非常重要的角色，从人类发展的“无所不在”，到现代工业“血液”和“刚柔并济”，从地球生命繁衍生息，到我们吃的食物、穿的衣服、燃烧的大多数化石燃料及使用的其他许多材料中，含碳资源<sup>①</sup>都有着诸多重要应用。

现代人类社会经济发展过程中，含碳资源的用途大致归纳如下：

#### （一）碳能源

碳不仅在一定时期内，以动植物形态成为人类生活的必需品或生物质能源，更可以历经长期地质沉积和构造演化，在化学上自我结合形成大量不同种类的碳基化石矿物能源，统称为碳能源。

随着近代科学进步和社会经济发展的需要，人类开采消耗了巨量的碳基化石矿物能源，这种开采消耗好似一匹脱缰野马不停剧增。碳基化石矿物能源亦称为化石能源，主要泛指碳氢化合物或其衍生物，包括煤炭、石油和天然气等。化石能源的运用使现代工业大规模快速发展，把人类从传统的农耕生活方式中解放了出来。

#### （二）碳原料

碳在化学上可以形成大量化合物，在现代工业中作为原料和燃料有着广泛的应用。例如，碳可以用于制造钢铁、铝、铜等金属的冶炼过程中，还可以用于制造石墨、炭黑、活性炭等材料，这些材料是电池、电解槽、电极等领域的重要原材料。化石能源燃料可以产生大量的能量，推动涡轮机产生动力。区别是旧式的发电机是使用传统蒸汽来推动涡轮机，现代的火力发电站都已采用燃气涡轮引擎直接来推动涡轮机。

碳在生命科学中扮演着非常重要的角色，是生命结构中非常重要的元素之一，也是构成有机生命体的基本元素，地球生物体内大多数分子都含有碳元素，如葡萄糖、脂肪、蛋白质等都是由碳元素组成的。此外，碳元素还是 DNA 和 RNA 的基本组成部分，这些分

<sup>①</sup> 广义的碳资源概念界定应该是指对人类有广泛用途的含碳元素物质，狭义理解碳资源是指在地球表面（如动植物）或固结在地下岩石圈中，以单质碳或碳基化合物以不同物质形态储存的自然资源。

子是生命体中的遗传物质，控制着生命体的生长和发育。碳在医学中也有着重要的应用，如碳元素可以用于制造人工心脏瓣膜、人工骨骼等医疗器械。此外，碳元素还可以用于制造药物，如阿司匹林、维生素 C 等药物都是由碳元素组成的。

### （三）碳环保

碳元素在当代自然环境保护中也有着重要的应用。例如，碳元素可以用于制造过滤器，用于净化空气和水。此外，碳元素还可以通过生物质废弃物的循环再生用于制造生物燃料，如生物柴油、生物乙醇等，这些燃料再利用可以减少对常规化石能源燃料的依赖，以减少二氧化碳的排放。无定形碳由于具有极大的表面积，常被用来吸收毒气、废气。富勒烯和碳纳米管则对纳米技术极为有用，由于石墨的分子间只有微弱的范德华力，所以它们容易滑动，适合用作润滑剂，而石墨处于高温时不容易挥发，所以适合在挖掘隧道时使用。

碳资源除了用作化石能源、生产原料，以及用于环境保护之外，在人类社会中还其他开发利用形式。例如，测量古生物化石中 C-14 的含量，可以得知其历史年代，这叫作 C-14 断代法；石墨可以直接用于制作炭笔，也可以与黏土按一定比例混合做成不同硬度的铅笔芯；金刚石是硬度极大的碳单质，除了可以制作装饰品外，还可用于工业切削。

总而言之，碳对于现有已知的所有生命系统都是不可或缺的，也是地球生命有机体生生不息、代代延续的根本，也是人类身体的最基本组成部分，没有碳，生命不可能存在。

## 第二节 碳循环的基本原理

如本章第一节所述，碳与其他化学元素结合形成不同种类的碳基化合物，因此碳可以在活的有机体和死亡的有机体中巨量赋存，并在大气层、深海大洋、岩石和土壤不同层系之间进行自然交换。比如，我们人体的每一次呼吸，都会从肺部呼出二氧化碳并释放到空气中，而我们身边的植物再通过光合作用，把空气中的二氧化碳转化为固态的碳物质，这些含碳元素物质形态不断循环往复变化的过程就是我们日常所说的“碳循环”。

### 一、碳循环

据科学研究资料分析，地球上碳元素在不同碳储库之间通过物理的、化学的和生物的过程相互交换，保持了一种长期的动态平衡。

基于学术研究角度，碳循环表示在生态系统内碳的变化，它指的是碳在不同地理环境之间的流动，从碳源到碳汇动态地在大气中、水体中、土壤中、植物体内及生物体内来回流动的过程，这个概念解释涉及生态系统、碳源、碳汇等关键词，后续章节再做具体阐释。

碳循环是一个复杂的物理、化学、生物转化过程，通过植物、动物、土壤和大气之间的相互作用，碳元素在不同环境中转移和转化，这个循环过程在维持地球生态系统的稳定

和平衡中起着重要的作用。

## 二、碳循环的基本形式与属性特征

### (一) 碳循环的基本形式

碳在自然界中的流动构成了碳循环，碳循环过程极其复杂而周密，它保证了生物圈乃至整个地球生命物质的平衡与发展。

碳的主要循环形式是从大气中的二氧化碳库中开始，经过生产者的光合作用，把碳固定，生成糖类，然后经过消费者和分解者，在呼吸和残体腐败分解后，再回到大气蓄库中。碳被固定后始终与能量流动密切结合在一起，生态系统的生产力的高低也是以单位面积中碳的含量来衡量。植物通过光合作用，将大气中的二氧化碳固定在有机物中，包括合成多糖、脂肪和蛋白质，贮存于植物体内。食草动物吃了以后经消化合成，通过一个营养级，再消化再合成。在这个过程中，一部分碳又通过呼吸作用回到大气中；另一部分成为动物体的组分，动物排泄物和动植物残体中的碳则由微生物分解为二氧化碳，再回到大气中。

自然界中的碳循环，包括碳固定与碳释放两个交互变化阶段，其基本形式包括以下五个方面，如图 1-3 所示。

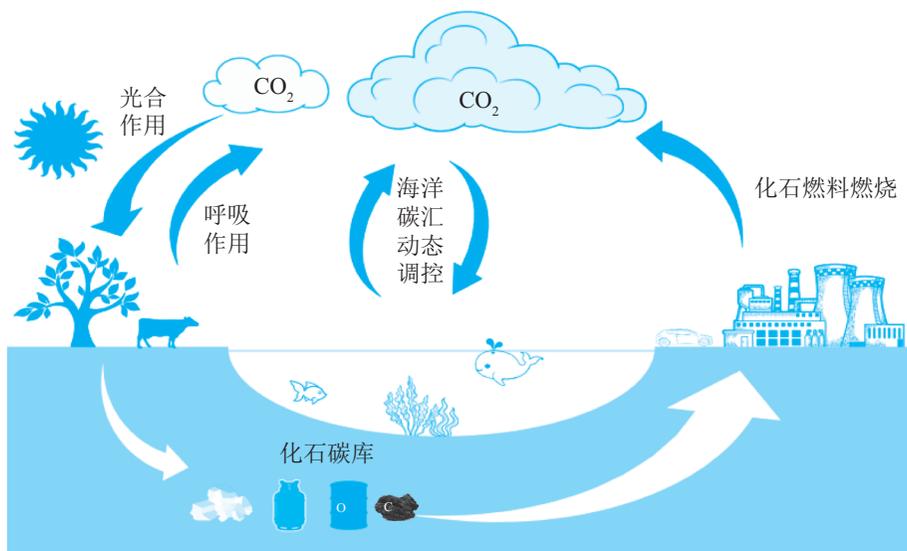


图 1-3 碳循环基本形式

#### 1. 大气中的二氧化碳吸收

大气中的二氧化碳通过光合作用被植物吸收。植物利用光能、水和二氧化碳进行光合作用，将二氧化碳转化为有机物质，如葡萄糖，同时释放氧气。

#### 2. 碳的固定和储存

通过光合作用，植物将二氧化碳固定在有机物质中，这些有机物质被储存在植物的组织中，如根、茎、叶和果实。部分碳可能被储存在土壤中，形成有机质，或进一步形成化

石燃料，如煤、石油和天然气等。

### 3. 碳的释放和分解

当植物和动物死亡或呼吸时，它们的有机物质会被分解，并释放出二氧化碳。这个过程称为呼吸作用。此外，有机物质也可以通过腐烂和分解过程中的微生物活动转化为二氧化碳。

### 4. 碳的交换和循环

通过植物的呼吸作用和有机物质的分解，二氧化碳再次释放到大气中，形成一个碳的交换循环。这种循环在大气、陆地和海洋之间发生。

### 5. 碳的储存和吸收

部分二氧化碳被大气吸收并溶解在水中，形成碳酸盐，并进入海洋。海洋中的生物，如浮游植物和浮游动物，也通过光合作用和呼吸作用参与碳循环。此外，一部分二氧化碳也可以在土壤中被吸附和储存。

## （二）碳循环的属性特征

根据有关文献资料，碳循环的属性特征可从系统结构分析和系统动态演化两个视角进行梳理。

### 1. 基于系统结构分析视角

基于系统结构分析，碳循环是在地球生物圈中，碳以不同物质形态周而复始地动态循环变化的闭环变化过程，具有全球性和循环性两个基本特征。

（1）全球性。碳循环范围是生物圈，自然界碳循环的基本过程为：大气中的二氧化碳被陆地和海洋中的植物吸收，然后通过生物或地质过程及人类活动，又以二氧化碳的形式返回大气中，即碳循环发生在生物圈各个环节中。

（2）循环性。在碳的生物循环中，大气中的二氧化碳被植物吸收后，通过光合作用转变成有机物质，通过生物呼吸作用和细菌分解作用，又从有机物质转换为二氧化碳而进入大气。碳的生物循环包括了碳、植物及环境之间的迁移。

### 2. 基于系统动态演化视角

基于系统动态演化视角，碳循环系统结构具有以下特点：

（1）碳循环是一个复杂的大系统，包括大气、陆地、海洋等多个环境子系统。

（2）碳循环过程中，碳元素会在不同环境系统中进行物质转化，包括有机碳和无机碳之间的转化。

（3）碳循环过程中，生物和非生物过程相互作用，相互影响，相互制约。

（4）碳循环可有效控制气候变化、维持生态系统平衡等。

## 三、碳循环类别及层次划分

### （一）碳循环类别

碳是构成生物体的基本元素之一，也是构成地壳岩石、煤炭、石油、天然气等化石矿

物的主要元素，而碳元素的循环主要通过二氧化碳排放和吸收来进行。按照碳循环对全球气候所产生的影响来看，可以将碳循环分为可再生的、正常的碳排放，以及不可再生的、非正常的碳排放。

### 1. 可再生的、正常的碳排放

可再生碳循环，即非常的碳排放，是指大自然原始的生态碳循环系统，具体包括：

(1) 植物经光合作用将大气中的二氧化碳和水化合生成碳水化合物（糖类），在动物的呼吸中又以二氧化碳返回大气中被植物再度利用。

(2) 植物被动物采食后，糖类被动物吸收，在体内氧化生成二氧化碳，并通过动物呼吸释放回大气中又可被植物利用。

科学家们在《京都议定书》<sup>①</sup>中强调地球表面的碳循环，是一个亿万年来不断演变而成的正常的碳循环系统，这个系统中，地球自身的任何碳排放、转换都应该是基本平衡的，并且由于“自然碳汇”的存在，正常的碳循环不会导致地球大气中碳含量发生巨大变化，也不会对地球温度产生重大影响。

### 2. 不可再生的、非正常的碳排放

不可再生碳循环，即非正常的碳排放，是指煤炭、石油和天然气等不可再生物质燃烧时生成的二氧化碳，其返回大气中后重新进入生态系统的碳循环，这也是本书所关注的碳循环。

伴随现代工业的迅速发展，人类大量使用煤炭、石油等化石燃料，使地层中经过千百万年积存的已经脱离碳循环的碳元素，在短时间内释放出来，打破了生物圈中碳循环的平衡，使大气中的二氧化碳含量迅速增加，导致气温上升，形成“温室效应”，此类碳循环是决定全球气候的关键。

由于当今这种碳排放在规定时间内大规模爆发，导致大气中温室气体积累过多，超出了地球自身的循环能力，因此要消解这种碳循环对气候变化的影响需要的时间就会更长，这也是不可再生的碳排放最显著特征之一。

## （二）碳循环的层次

地球上的碳循环至少有3个层次：第一层次是生物圈与大气圈间的二氧化碳循环，以季节到百年尺度为周期；第二层次涉及深海的碳酸盐沉积与溶解，碳循环以万年尺度为周期；第三层次是板块运动中岩石圈的碳循环，以千万年以上尺度为周期。

### 1. 第一层次碳循环（以百年尺度为周期）

生物圈与大气圈间的碳循环主要表现为地面绿色植物通过光合作用将大气和水中的二氧化碳固定，生产有机碳化合物。有机碳化合物通过食物链和食物网传递，生物圈中的动物、细菌、真菌等通过呼吸作用再将有机物分解成二氧化碳等物质，其中二氧化碳会重新回到大气和水。

具体而言，生物圈的生产者会通过光合作用将二氧化碳转化为含碳有机物，此时这些

<sup>①</sup> 《京都议定书》于1997年在日本京都召开的《联合国气候变化框架公约》第三次缔约方大会上通过，旨在限制经济发达国家温室气体排放为主，以抑制全球气候变暖的全球性国际性公约。

有机物一方面被生产者自身使用，另一方面被生物圈的其他生物所利用，消费者直接或间接以生产者为食，有机物中的碳元素开始通过食物链和食物网传递，消费者通过呼吸作用产生二氧化碳和水，此时存在于有机物的碳变为气态二氧化碳，而动物和植物排出的部分废物和遗体则会被分解者分解，分解者通过呼吸作用将动植物遗体中的有机物分解为二氧化碳，此时碳元素进一步传递并开始循环。

## 2. 第二层次碳循环（以万年尺度为周期）

海洋碳酸盐沉积是大洋碳储库演变历史最直接也是最简便的分析依据。不同时期碳酸盐沉积的特征，反映了海水化学的演变历程。海洋碳酸盐沉积的演变历程，记录了碳循环转型的历程，这种转型正是生物圈演化的反映。

深海大洋碳酸盐最初属于化学沉积，至多只有原核类的微生物参与其化学过程，然后发展到真核生物骨骼组成的生源沉积，生源沉积又从浅水底栖生物转到深海浮游生物。这是地球系统中水圈和生物圈共同变化的经历，也是碳酸盐补偿深度在显生宙逐步加深的过程。这种生源碳酸盐沉积由浅海型向深水型的转折，是大洋碳循环的转型。

## 3. 第三层次碳循环（以千万年以上尺度为周期）

碳循环是维持地球表层生命活动的主要物质循环，其中地球表层系统中的碳，绝大部分以沉积物的形式储存在岩石圈中的储存库里，只有少量的碳物质可以被不同生物种类吸收和利用。储存库中的碳，以碳水化合物形式存在于有机物质中，如岩石中的石油、天然气、煤炭等，或以无机物的形式存在于矿物碳酸盐中，如碳酸钙等。

储存库里的碳，一般情况下是不参加碳循环的，除非岩石被风化、化石燃料被利用，或火山活动将其以二氧化碳和一氧化碳的形式带到大气中。大气活性库中的碳，不到全部碳的2%。它主要是通过生物的呼吸作用来补充的，火山喷发、人类燃烧化石燃料也是其重要来源。

# 四、碳循环对人类可持续发展的重要性

碳循环对人类生态系统及可持续发展有着十分重要的意义，它不仅可以改善生态环境，也可有效保持生态系统演化的稳定性和可持续性，进而形成并改善地球生态系统的生物多样性。

碳循环对生态系统的影响可以归纳为以下几个方面：

### （一）碳循环可以改善生态环境

在碳循环过程中，大气中的二氧化碳能够进入植物体内，经过光合作用将二氧化碳转化为有机物质，从而提高生态系统的空气质量。此外，植物体在光合作用过程中产生的氧气也可改善生态系统的水质。

### （二）碳循环可以帮助保持生态系统的稳定性

碳循环可以帮助释放有机物质到自然环境中，这些有机物质可以提供给生物体所需的营养，从而稳定生态系统的生物量和营养水平，从而有助于维系环境的稳定性。

### （三）碳循环可以促进生态系统的生物多样性

碳循环能够提供大量的水分、能量和营养物质，使生态系统里的所有生物都能获得良好的生长条件，从而促进生态系统的生物多样性。

## 第三节 碳循环的科学认知

基于不同学科研究视角，我们可以将对碳循环所有研究认知汇聚成一个诸多学科交叉演化的“同心圈”，科学研究和学术进步便推动了不同学科碳循环研究“圈边界”的融合和发展。碳循环“同心圈”以外的学科区域探索是无穷的，这意味着地球乃至广阔宇宙碳循环的科学研究认知也是无限的。

基于此，在当今人类所拥有诸多科技创新推动下，人类改善碳循环失衡造成的气候环境变化付出的诸多努力也将变得更加现实。如图 1-4 所示，我们可以从生物学、化学、地理学、经济学、哲学等传统基础学科视角认知碳循环科学。然而，伴随全球气候变化和自然环境问题的日趋严峻，资源科学、环境科学、生命科学、能源科学、信息科学等诸多学科领域专家学者相继开展了碳循环的科学探索和技术研发，与碳循环相关的新兴交叉学科，甚至传统学科集成也应运而生。

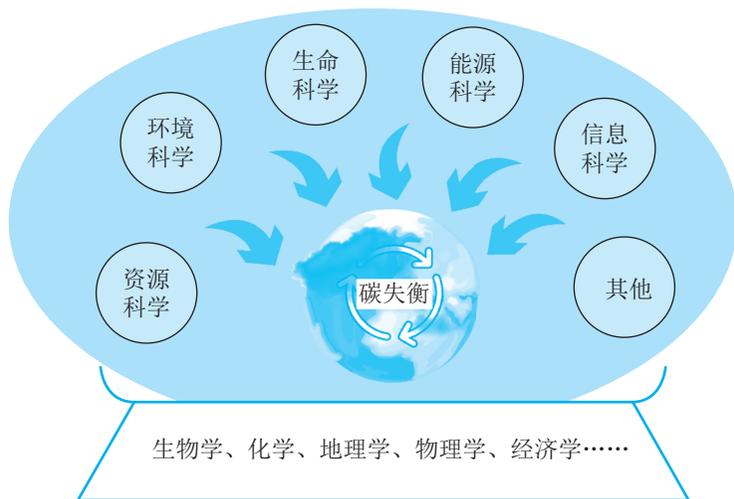


图 1-4 碳循环学术认知及学科支撑体系示意图

### 一、碳循环的生物学认知

众所周知，碳是人类身体的基本组成部分，它也存在于我们吃的食物、穿的衣服、燃烧的大多数燃料，以及使用的其他许多材料中，而且 90% 以上的化合物中都含有碳。这并不奇怪，因为碳很容易与其他元素结合，也很容易与自身结合。碳可以在活的有机体和死亡的有机体、大气、海洋、岩石和土壤之间进行交换。我们每一次呼吸，都会从肺部呼出二氧化碳并释放到空气中，这些气体包含我们所食用的动植物中的碳原子。

在碳的生物循环中，大气中的二氧化碳被植物吸收后，通过光合作用转变成有机物质，然后通过生物呼吸作用和细菌分解作用从有机物质转换为二氧化碳而进入大气。碳的生物循环包括了碳在动、植物，以及环境之间的迁移。

植物扮演类似生物“厨师”的角色，采取阳光，然后从空气中吸入二氧化碳，将它们混合在一起，接着在碳水化合物中创造出一种共存形式的能量，如葡萄糖、蔗糖等。这个过程叫作光合作用。温室气体是动物将食物转化为所需能量过程的一个副产品，并且借由废物被释放。如果这些植物死了，它们会腐烂，小小的微生物会分解这些碳水化合物，然后再次释放其副产品——温室气体。

碳在大气层、有机生物体、陆地和海洋之间的分布会随着时间的推移而不断发生变化。根据有关文献资料，距今 6.35 亿年前形成的石灰岩和白云岩当中的同位素发现，当时地球大气中的二氧化碳浓度至少为 12 000ppm<sup>①</sup>，2009 年地球大气圈的二氧化碳浓度仅为 380ppm，仅为 6.35 亿年前的二氧化碳浓度约三十分之一。大气中的这些碳都跑到哪儿去了呢？它们大部分都转移到了沉积岩（如石灰岩）中，其发生方式是碳循环的一部分。因此，碳循环是许多生物经过复杂化学和物理过程的结合，碳在这些过程中发生大规模的物质形态循环转移。

## 二、碳循环的地球化学认知

碳的地球化学循环控制了碳在地表或近地表的沉积物和大气、生物圈及海洋之间的迁移，而且是对大气二氧化碳和海洋二氧化碳的最主要的控制。沉积物含有两种形式的碳：干酪根和碳酸盐。

在风化过程中，干酪根与氧反应产生二氧化碳，而碳酸盐的风化作用却很复杂。白云石和方解石矿物中的碳酸镁和碳酸钙受到地下水的侵蚀，产生出可溶解于水的钙离子、镁离子和重碳酸根离子，其由地下水最终带入海洋。在海洋中，浮游生物和珊瑚等海生生物摄取钙离子和重碳酸根离子来构成碳酸钙的骨骼和贝壳。这些生物死亡之后，碳酸钙就沉积在海底而最终被埋藏起来。

就碳循环的科学认知而言，人类对于自然与生态系统对未来气候反应的预测能力十分有限，尤其对陆地碳蓄积还缺乏一致性的估算数据，包括碳通量和净碳通量<sup>②</sup>；全球模式比较分析中对全球净第一生产力（NPP）<sup>③</sup>的估算值相差 15% 左右。土地利用变化的时间序列以及砍伐后森林和废弃农田再生长造成的碳吸收以及人类活动对碳循环的影响机理和未来动态变化等问题有待进一步研究。

基于此，提高对碳循环、水循环及多圈层相互作用的认识改善对整个气候系统的预测能力，对进行有效的生态与环境保护具有重大意义。1992 年启动的全球变化与陆地生态

① ppm 是浓度单位，即一百万份喷洒液中有效成分，根据国际规定现统一用毫克 / 升来表示。

② 碳通量是指碳循环过程中，在单位时间、单位面积内二氧化碳从一个库向另一个库的转移量，如某森林生态系统碳通量是单位时间和单位面积碳循环总量，海洋碳通量则是单位时间和单位面积内碳增减数量。

③ NPP (Net Primary Productivity, 净初级生产力)，具体指绿色植物在单位时间、单位面积内所累积有机物质数量，是由植物光合作用所产生的有机质总量中减去自养呼吸后的剩余部分，也称净第一生产力。

系统（GCTE）及其他研究表明，大气中较高的二氧化碳含量不仅导致气候的变化，而且二氧化碳的施肥效应和大气氮沉降会提高陆地生态系统的 NPP，因此失汇可能为陆地生态系统吸收。

### 三、碳循环的古地理学认知

碳元素主要存储在岩石和沉积物中，只有小部分以变化的形式存在于大气、海洋、土壤和陆地生物圈中。大气中主要的含碳化学成分有二氧化碳、一氧化碳和甲烷，其中二氧化碳是大气中最重要的部分。就物质循环来说，碳循环的主要环节是二氧化碳的循环。

二氧化碳是光合作用的最基本成分，其总量多少对气候和生物圈有重要的影响。占大气总量 98% 的  $N_2$ 、 $O_2$ 、Ar 不吸收红外辐射，而二氧化碳、水汽、甲烷则吸收来自地面的长波辐射，加热大气同时发射长波辐射加热地面。正是此物理过程才使地球保持了目前的温度。

通过对过去  $4 \times 10^5$  万年间气候极端事件的研究表明，在此期间地球经历了冰期和间冰期的巨大气候变化，但是大气中的二氧化碳的变化量始终在平均值  $240 \mu\text{g/g}$ <sup>①</sup> 的上下 20% 范围内变化。取自冰芯和深海沉积物的记录显示，最近几十万年以来冰期一间冰期气候激烈变化的同时伴随着温室气体（二氧化碳、甲烷、 $N_2O$  等）浓度的变化。

### 四、碳循环的物理学认知

二氧化碳是导致气候变化的主要温室气体，那么二氧化碳是如何进入我们的大气层呢？碳元素是碳循环的一部分，但碳循环的原始动力来自太阳。太阳光使地球表面的热量提高，其一小时所产生的能量比整个世界一年所使用的还要高。

我们可以动手感受一下这个现象的原理，首先打开一瓶苏打水，分别倒入两个玻璃杯中。将一杯放入冰箱中冷藏，另一杯置于室温环境中，1 小时后拿来品尝一下，你会发现放入冰箱的那杯液体的气泡较多。大气中的二氧化碳的浓度在寒冷时期开始后才会降低。

在冰河时代结束后，二氧化碳的低浓度可能会保持一段时间，直到进入温暖期。这说明二氧化碳浓度的变化并不是重大气候变化的推动力。但是当气候变冷时，二氧化碳的浓度会下降，导致产生一个不断加强的冷却效果。而当气候变暖时，更多的二氧化碳被释放，进入到大气中，因而又进一步提升了全球气温，这就是正向反馈循环。

我们能做些什么呢？希望阻止全球气温进一步升高，已经太迟而且不可能成功。当前大气中的二氧化碳的含量，一定会促使全球气温进一步升高。但是我们可以通过几种方法来稳定并改善局面：更高效使用能源，以降低二氧化碳的排放；使用不会排放二氧化碳的其他能源，如太阳能、风能、核能、地热能和水力电能；使用矿物燃料时，收集和存储产生的二氧化碳，而不是将其排放到大气中。

① 质量单位， $1 \mu\text{g}$  等于一百万分之一克。

## 知识专栏 1-1 碳循环经济的理解

随着人类经济活动的不断发展，环境污染、能源短缺等问题日益突出，碳循环经济作为一种新型经济发展模式，备受世人关注。那么，什么是碳循环经济呢？

### 一、碳循环经济的定义

碳循环经济就是通过对碳素的循环利用，实现经济的可持续发展。它是一种以低碳、零排放为基础的经济模式，旨在充分利用碳素资源，减少碳排放，实现经济、环境和社会的协调发展，其核心发展理念是“碳素是资源，而非垃圾”。简单来说，碳循环经济概念可以用4个“R”概括，即减少碳排放（Reduce）、碳的再利用（Reuse）、碳的再回收（Recycle）以及碳消除（Remove）。

### 二、碳循环经济的原理

碳循环经济的原理是在碳素循环利用的基础上，实现经济的可持续发展。具体来说，碳循环经济的实现需要遵循以下原则：

（1）循环利用碳素资源。碳素是一种重要的资源，包括煤、石油、天然气、木材等。通过回收利用碳素资源，可以减少资源浪费，提高资源利用效率。

（2）减少碳排放。碳排放是造成环境污染和气候变化的主要原因之一。通过采用低碳技术和清洁能源，减少碳排放，可以保护环境，促进经济可持续发展。

（3）推动碳循环经济的全面发展。碳循环经济的实现需要政府、企业、社会各方面的共同努力。政府需要制定相关政策，鼓励企业投资碳循环经济，促进碳循环经济的全面发展。

### 三、碳循环经济的实现途径

碳循环经济的实现途径主要包括以下几个方面：

（1）发展清洁能源。清洁能源是碳循环经济的重要支撑，包括太阳能、风能、水能等。通过发展清洁能源，可以减少对传统能源的依赖，降低碳排放。

（2）推广低碳技术。低碳技术是实现碳循环经济的重要手段，包括节能技术、清洁生产技术、循环经济技术等。通过推广低碳技术，可以减少碳排放，提高资源利用效率。

（3）加强碳素回收利用。碳素回收利用是碳循环经济的核心内容，包括废弃物回收利用、生物质能回收利用等。通过加强碳素回收利用，可以减少资源浪费，提高资源利用效率。

### 四、碳循环经济的意义

碳循环经济的实现对于经济、环境和社会的发展都具有深远的意义：

（1）促进经济可持续发展。碳循环经济可以提高资源利用效率，减少资源浪

费，降低能源消耗，从而促进经济可持续发展。

(2) 保护环境。碳循环经济可以减少碳排放，降低环境污染，保护生态环境。

(3) 推动能源转型。碳循环经济可以推动能源转型，从传统能源向清洁能源转型，以应对能源短缺和环境污染等问题。

(4) 增强国际竞争力。碳循环经济是世界各国共同关注的问题，通过推动碳循环经济的发展，可以增强国家的国际竞争力。

## 五、结语

碳循环经济是一种新型经济发展模式，具有广泛的应用前景和深远的意义。通过推广低碳技术、发展清洁能源、加强碳素回收利用等途径，可以实现碳循环经济的全面发展，促进经济、环境和社会的协调发展。

## 第四节 碳循环失衡原因及不利影响

在人类历史发展过程中，碳循环过程复杂而周密，它保证了地球生物圈乃至整个地球的平衡发展。在过去的几千年中，海洋和陆地生态系统等自然碳资源排入大气的大量二氧化碳已通过光合作用和海洋吸收等自然过程清除，几乎处于完全平衡状态。据研究资料（Martin 等，2014）显示，世界工业革命以前，大气中的二氧化碳浓度平均值约为 280ppm，变化幅度在 10ppm 以内，平均而言，这一时期的自然碳收支处于很好的碳平衡状态。碳循环过程复杂而周密，它保证了生物圈乃至整个地球的平衡发展。

如前所述，碳资源具有十分广泛的用途，其过度开发利用造成了大自然碳循环状态非正常加快。尤其是在世界工业革命之后的短短 200 多年时间里，人类的生产和生活方式逐渐改变了地球的生态平衡，二氧化碳浓度快速增加，碳收支失衡不断增长、积累。碳循环平衡的严重破坏，造成了大量自然环境污染和异常气候变化<sup>①</sup>，其中最突出的问题就是碳循环失衡造成的人类生存危机（邹才能等，2022）。

所谓碳循环失衡是指在地球大气和生物圈中的碳循环过程中，碳的输入和输出之间出现不平衡的现象。具体而言，碳循环失衡是指地球上的二氧化碳、甲烷等温室气体在陆地、海洋、大气等各个领域之间的流动出现异常状态，这种异常状态导致大气中多余二氧化碳的累积“冗余”。与此相对应的则是碳平衡，碳平衡是现代人为减缓全球变暖所作的努力之一。利用这种碳平衡环保方式，人们或企业计算自己日常活动直接或间接制造的二氧化碳排放量，并计算抵消这些二氧化碳所需的经济成本，然后通过“排放多少碳就做多少抵销”措施，来达到原排放者的碳平衡。

<sup>①</sup> 气候变化指气候平均状态统计学意义上的巨大改变或者持续较长一段时间的气候变动。气候变化不但包括平均值的变化，也包括变率的变化。

## 一、碳循环失衡原因及机制

全球碳循环失衡机制如图 1-5 所示。

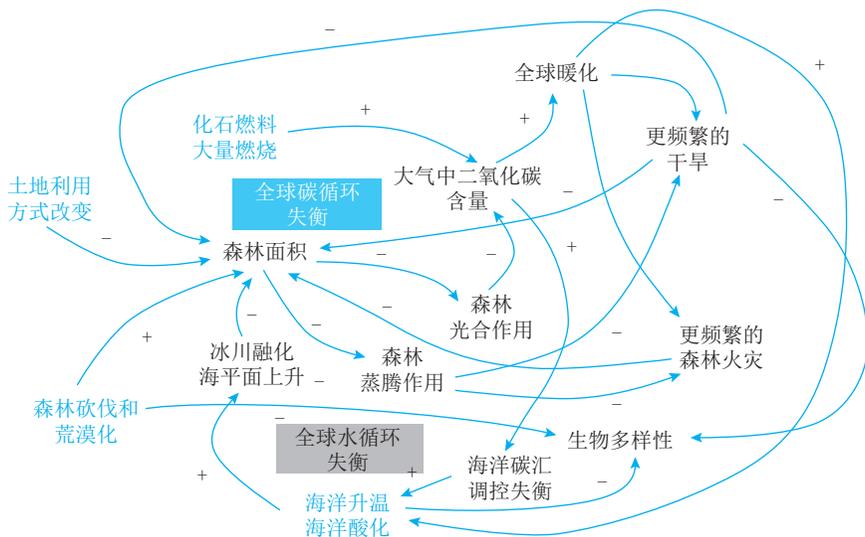


图 1-5 全球碳循环失衡机制

### （一）化石燃料大量燃烧

就碳基化合物储存形态而言，化石燃料是地球上碳氢化合物的主要储存之一。但是工业革命以来，世界各国，尤其是西方国家经济的飞速发展，是以大量消耗能源资源为代价的，并且造成了生态环境的日益恶化。统计资料显示，1950 年全球排放量上升到每年 60 亿吨二氧化碳，1990 年这一数量翻了近两番，达到每年超过 220 亿吨，2020 年全球每年排放近 340 亿吨二氧化碳。大量化石矿产能源和生物质能源燃烧会导致大量二氧化碳进入大气中，形成温室效应，导致全球气候变化，进而影响全球生态平衡，因此化石矿产能源和生物质能源的大量燃烧是地球碳循环失衡的主要原因之一。

### （二）土地利用方式变化

除了化石能源燃料和生物质能源的大量燃烧之外，土地利用变化也是导致地球碳循环失衡的原因之一。随着城市化进程的不断推进和高密度城市地区的发展，当今世界一半以上的人口居住在城市地区，土地利用模式发生了很大改变，这种土地利用方式对城市区域的植被生长产生着复杂的影响。据统计，相对于 2000 年，2015 年在世界 4 256 个城市地区中，有一半以上城市因面积增加导致植被覆盖面积减少。由于土地的破坏和改造，植被覆盖率下降，植物吸收二氧化碳的能力受到限制，导致二氧化碳大量留存于大气中。

### （三）海洋升温 and 海洋酸化

海洋升温 and 海洋酸化也是导致地球碳循环失衡的重要原因之一。随着全球气候的变化，海洋环境也开始受到严重影响，不仅直接导致海洋表面的温度不断升高，也导致了海

洋生物死亡数量的增加。据 2019 年 9 月 10 日的新闻消息，在太平洋地区，美国西海岸又出现大面积水温升高。在此期间，该海域死亡的太平洋鳕鱼数量达到 1 亿多条，海鸟死亡数量近 50 万只，座头鲸数量减少了 30%，还有其他大量海洋生物出现数量骤减。此外，由于二氧化碳的溶解导致海洋酸化，造成了珊瑚礁和有机物质的严重损失，影响了海洋生态系统。

#### （四）森林砍伐和荒漠化

森林是地球上吸收二氧化碳的主要地方之一，但是由于人类的砍伐活动和大面积的森林荒漠化，森林面积不断减少，二氧化碳吸收能力严重下降。据 2020 年《全球森林资源评估》报告指出，1990 年以来全球共有 4.2 亿公顷森林遭到毁坏。据巴西国家空间研究所（INPE）的数据显示，2010 年至 2021 年间，巴西年度砍伐地球“绿肺”亚马孙森林量从 2010 年的约 7 000 平方千米增加到 2021 年的超过 1.3 万平方千米，增幅约 86%。这种森林砍伐和荒漠化趋势既给全球生态系统造成了巨大压力，也对全球气候变化产生了不可忽视的影响。

## 二、碳循环失衡自然环境及社会影响

人类进入 21 世纪，大气圈中因过度消费高碳化石能源造成过多二氧化碳“冗余”。这些二氧化碳“冗余”造成碳循环严重失衡让人越发担心，它成为我们头顶挥之不去的“乌云”，其对人类生存环境、身体健康以及社会经济等一系列深层次影响已为社会大众所关注（张桂华等，2006）。

### （一）碳循环失衡对自然环境的影响

碳循环失衡对自然环境产生了诸多不可逆的严重影响，也极大破坏了地球生命的自然生存条件、有限的生存空间以及环境承载力。比如，碳循环失衡直接导致全球气候变暖和平均气温升高，让地球南北两极及高寒区域冰川大量融化，冰川融化就会导致海平面的升高。海平面上升、气候异常、极端天气会给人类的生活带来很多负面影响。

地球气温升高所带来的热能，会提供给空气和海洋巨大的动能，从而形成大型，甚至超大型台风、飓风、海啸等严重自然灾害。同时，气温升高不仅会从海洋直接吸取水分，还会从陆地吸取宝贵的淡水资源，使得内陆地区出现大面积干旱，从而造成粮食减产，动物饲料也同样减产。

近年来，极端天气条件造成的地球气温异常和区域性极端降水，已导致自然灾害、农业产量减少、水资源短缺等严重问题。同时，世界沿海地区的大片陆地未来也将逐渐被海水所淹没，居住在沿海地区的居民的人，生命安全受到严重影响。

### （二）碳循环失衡对生态系统的影响

随着气候变暖，全球生态系统面临崩溃的压力，植物和动物的生态圈被破坏，种群数量减少、物种消失、生物多样性减少，人类将会面临长期的影响和风险，甚至可能失去一部分食物来源和药物来源。

气温升高所融化的冰山，正是我们赖以生存的淡水最主要的来源，碳循环失衡使得自然界食物链逐渐断裂。同时，大气中二氧化碳含量上升，会导致海洋中二氧化碳含量上升，使海洋碳酸化，杀死大量微生物。海洋温度上升也会破坏大量以珊瑚为中心的生物链。

地表温度的升高还会使水分蒸发的速度加快，从而导致降雨量增加，降雨时长也会随之变长。气候变化对地球产生的影响也是非常明显的，比如，冰川消融、极端气候、粮食减产、海平面上升、物种灭绝、空气污染等。

### （三）碳循环失衡对社会经济及人类生命健康的影响

全球碳排放量的增加可能会导致资源的短缺，特别是与能源有关的。据统计，全球碳排放量的增加会导致酸雨增加、空气污染加剧、能源供应不足等一系列问题，这些问题必然会对社会经济和人类生命健康造成负面影响。

城市降雨量增加会导致城市内涝，并对交通带来很大的影响。而农村的田地也会因为降水过多影响产量，还有一些山区，还会引发泥石流、山洪等自然灾害。全球变暖最可怕的地方是它会让全球的气候随之改变，而我们人类是没有办法脱离大自然的环境的，因为我们人类的生活离不开工业化，无论在交通还是在生产上，每天都在释放大量的有害气体。

全球变暖将会对整个地球的气候产生影响，生活在这个星球上的所有动植物都会被影响到，我们人类的生活和身体健康自然也会受到很大的影响。仅就身体健康来说，长期暴露在大量的温室气体中，人们可能会患上健康问题，如呼吸系统和皮肤疾病、心脏病等，另外大气污染和热带气旋的影响可能使空气呼吸感染病变频发。

### （四）碳循环失衡对当代国际政治的影响

碳循环失衡不纯粹是生态环境问题，而是牵涉广大发展中国家发展道路和经济发达国家历史责任的问题，也是牵涉几乎世界上所有国家切身利益的问题。碳循环失衡是过多二氧化碳排放造成的人类生存危机，而对二氧化碳排放采取限制措施则是缓解碳循环失衡的最有效手段。

多年来，碳循环失衡一直是无法回避的国际政治经济问题，因为限制二氧化碳排放就等于限制了对传统化石能源的消耗，这必将对世界各国发展产生制约性影响。对经济欠发达的广大发展中国家而言，减排二氧化碳在短期内会影响经济增长速度，处理不好会产生致命性影响，而对经济高度发达的国家来说，减排二氧化碳同样影响其经济发展，且会在一定程度上降低国民生活质量。因此这种减排二氧化碳的分歧和争议不仅在发展中国家存在，在经济发达国家内部，也是一个非常棘手且充满争议的问题。

近年来，发展中国家和经济发达国家虽然在气候变化的历史责任、所承担责任和义务等诸多现实问题上存在比较大分歧，但由于事关全人类命运和共同发展利益。尽管全球气候谈判过程不太顺利，但在世界诸多国家及相关国际组织的积极努力下，在科学界、舆论界的大力呼吁推动下，全球二氧化碳减排事业还是取得了很大的进展。

## 推荐文献阅读

- [1] 邹才能等. 碳中和学 [M]. 北京: 地质出版社, 2022.
- [2] 付东, 王乐萌, 齐立强等. 碳循环与碳减排 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2022.
- [3] 周广胜. 全球碳循环 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.

## 课后思考题

1. 简述碳循环基本内涵, 以及碳循环类别、过程和属性特征。
2. 简述碳元素内涵、空间分布及碳资源主要用途。
3. 结合所学专业, 试述碳循环学术认知及学科支撑体系。
4. 思考碳循环失衡基本原因及对自然环境和社会影响。