



全球变化热门话题丛书

主编 秦大河

全球碳循环

GLOBAL CHANGE



周广胜 编著



气象出版社



全球变化热门话题丛书

主 编 秦大河
副主编 丁一汇 毛耀顺

全球碳循环

Quanqiu Tan Xunhuan

周广胜 编著

气象出版社

图书在版编目(CIP)数据

全球碳循环/周广胜等编著. —北京:气象出版社,2003.3
(全球变化热门话题/秦大河主编)

ISBN 7-5029-3547-9

I. 全… II. 周… III. 碳循环-普及读物 IV. X511-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 015628 号

气象出版社出版

(北京中关村南大街 46 号 邮编:100081)

责任编辑:郭彩丽 终审:周诗健

封面设计:新视窗工作室 责任技编:都平 责任校对:时人

*

北京京科印刷有限公司印刷

气象出版社发行 全国各地新华书店经销

*

开本:889×1194 1/32 印张:6.375 字数:156 千字

2003 年 3 月第一版 2003 年 3 月第一次印刷

印数:1—5000 定价:16.00 元

序 言

全球变化科学是从 20 世纪 80 年代发展起来的一个新兴的科学领域。其研究对象是气候系统(包括岩石圈、大气圈、水圈、冰冻圈和生物圈)、各子系统内部以及各子系统之间的相互作用。它的科学目标是描述和理解人类赖以生存的气候系统运行的机制、变化规律以及人类活动在其中所起的作用与影响,从而提高对未来环境变化及其对人类社会影响影响的预测和评估能力。近 20 年来,全球变化的研究方向经历了重大调整。首先是从认识气候系统基本规律的纯基础研究为主,发展到与人类社会可持续发展密切相关的一系列生存环境实际问题的研究;其次是从研究人类活动对环境变化的影响,扩展到研究人类如何适应和减缓全球环境的变化。全球变化的研究已经取得了重大的进展。

气候变化是全球变化研究的核心问题和重要内容。科学研究表明,近百年来,地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化。近 50 年的气候变暖主要是人类使用矿物燃料排放的大量二氧化碳等温室气体的增温效应造成的。现有的预测表明,未来 50~100 年全球的气候将继续向变暖的方向发展。这一增温对全球自然生态系统和各国社会经济已经产生并将继续产生重大而深刻的影响,使人类的生存和发展面临巨大挑战。

自工业革命(1750 年)以来,大气中温室气体浓度明显增加。大气中二氧化碳的浓度目前已达到 368 ppmv(百万分之一体积),这可能是过去 42 万年中的最高值。增强的温室效应使得自 1860 年有气象仪器观测记录以来,全球平均温度升高了 $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。

最暖的 14 个年份均出现在 1983 年以后。20 世纪北半球温度的增幅可能是过去 1 000 年中最高的。降水分布也发生了变化。大陆地区尤其是中高纬地区降水增加,非洲等一些地区降水减少。有些地区极端天气气候事件(厄尔尼诺、干旱、洪涝、雷暴、冰雹、风暴、高温天气和沙尘暴等)的出现频率与强度增加。近百年我国气候也在变暖,气温上升了 $0.4\sim 0.5^{\circ}\text{C}$,以冬季和西北、华北、东北最为明显。1985 年以来,我国已连续出现了 17 个全国大范围暖冬。降水自 20 世纪 50 年代以后逐渐减少,华北地区出现了暖干化趋势。

对于未来 100 年的全球气候变化,国内外科学家也进行了预测。结果表明:(1)到 2100 年时,地球平均地表气温将比 1990 年上升 $1.4\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ 。这一增温值将是 20 世纪内增温值(0.6°C 左右)的 2~10 倍,可能是近 10 000 年中增温最显著的速率。21 世纪全球平均降水将会增加,北半球雪盖和海冰范围将进一步缩小。到 2100 年时,全球平均海平面将比 1990 年上升 $0.09\sim 0.88\text{ m}$ 。一些极端事件(如高温天气、强降水、热带气旋强风等)发生的频率会增加。(2)我国气候将继续变暖。到 2020~2030 年,全国平均气温将上升 1.7°C ;到 2050 年,全国平均气温将上升 2.2°C 。我国气候变暖的幅度由南向北增加。不少地区降水出现增加趋势,但华北和东北南部等一些地区将出现继续变干的趋势。

气候变化的影响是多尺度、全方位、多层次的,正面和负面影响并存,但它的负面影响更受关注。全球气候变暖对全球许多地区的自然生态系统已经产生了影响,如海平面升高、冰川退缩、湖泊水位下降、湖泊面积萎缩、冻土融化、河(湖)冰迟冻与早融、中高纬生长季节延长、动植物分布范围向极区和高海拔区延伸、某些动植物数量减少、一些植物开花期提前等等。自然生态系统由于适应能力有限,容易受到严重的、甚至不可恢复的破坏。正面临这种危险的系统包括:冰川、珊瑚礁岛、红树林、热带雨林、极地和高山生态系统、草原湿地、残余天然草地和海岸带生态系统等。随着气候变化频率和幅度的增加,遭受破坏的自然生态系统在数目上会有所

增加,其地理范围也将增加。

气候变化对国民经济的影响可能以负面为主。农业可能是对气候变化反应最为敏感的部门之一。气候变化将使我国未来农业生产的不稳定性增加,产量波动大;农业生产布局 and 结构将出现变动;农业生产条件改变,农业成本和投资大幅度增加。气候变暖将导致地表径流、旱涝灾害频率和一些地区的水质等发生变化,特别是水资源供需矛盾将更为突出。对气候变化敏感的传染性疾病(如疟疾和登革热)的传播范围可能增加;与高温热浪天气有关的疾病和死亡率增加。气候变化将影响人类居住环境,尤其是江河流域和海岸带低地地区以及迅速发展的城镇,最直接的威胁是洪涝和山体滑坡。人类目前所面临的水和能源短缺、垃圾处理和交通等环境问题,也可能因高温、多雨而加剧。

由于全球增暖将导致地球气候系统的深刻变化,使人类与生态环境系统之间业已建立起来的相互适应关系受到显著影响和扰动,因此全球变化特别是气候变化问题得到各国政府与公众的极大关注。

1979 年的第一次世界气候大会(主要由科学家参加)宣言提出:如果大气中的二氧化碳含量今后仍像现在这样不断增加,则气温的上升到 20 世纪末将达到可测量的程度,到 21 世纪中叶将会出现显著的增温现象。1990 年 11 月,第二次世界气候大会(由科学家和部长参加)通过了《科学技术会议声明》和《部长宣言》,认为已有一些技术上可行、经济上有效的方法,可供各国减少二氧化碳的排放,并提出制定气候变化公约的问题。1991 年 2 月联合国组成气候公约谈判工作组,并于 1992 年 5 月完成了公约的谈判工作。1992 年 6 月联合国环境与发展大会期间,153 个国家和区域一体化组织正式签署了《联合国气候变化框架公约》。1994 年 3 月 21 日公约正式生效。截止到 2001 年 12 月共有 187 个国家和区域一体化组织成为缔约方。公约缔约方第一次大会于 1995 年 3 月在德国柏林召开。经过两年的艰苦谈判,1997 年 12 月在日本京都召开

的公约第三次缔约方大会上通过了《京都议定书》，为发达国家规定了到 2008~2012 年的具体的温室气体减排义务。

1988 年 11 月世界气象组织和联合国环境规划署建立了“政府间气候变化专门委员会(IPCC)”，其主要任务是定期对气候变化科学知识的现状、气候变化对社会和经济的潜在影响，以及适应和减缓气候变化的可能对策进行评估，为各国政府和国际社会提供权威的科学信息。自成立以来，IPCC 已组织世界上数以千计的不同领域的科学家完成了三次评估报告及“综合报告”。目前，IPCC 正在准备编写第四次评估报告，将于 2007 年完成。此外，还组织编写了许多特别报告、技术报告。IPCC 组织编写的这些评估报告，作为制定气候变化政策和对策的科学依据提交给国际社会和各国政府。它不仅为各国政府部门制定气候变化对策提供了科学信息，而且也直接影响着《联合国气候变化框架公约》及《京都议定书》的实施进程，并在荒漠化、湿地等其他国际环境公约的活动中发挥着越来越大的作用。

全球气候变化问题，不仅是科学问题、环境问题，而且是能源问题、经济问题和政治问题。全球气候变化问题将给我国带来许多挑战、压力和机遇。

国际上要求我国减排温室气体的压力越来越大。目前我国二氧化碳排放量已位居世界第二，甲烷、氧化亚氮等温室气体的排放量也居世界前列。预测表明，到 2025~2030 年间，我国的二氧化碳排放总量很可能超过美国，居世界第一位；目前低于世界平均水平的我国人均二氧化碳排放量可能达到世界平均水平。由于技术和设备相对落后、陈旧，能源消费强度大，我国单位国内生产总值的温室气体排放量比较高。

我国减排温室气体的潜力受到能源结构、技术和资金的制约。煤是我国的主要能源，在我国一次能源消费中，煤炭约占 70%。受能源结构的制约，我国通过调整能源结构来减少二氧化碳排放量的潜力有限。如果近期就承担温室气体控制义务，我国的能源供应

将受到制约。同时,因缺少相应的技术支撑,我国的经济发展将受到严重影响。因此,我国的能源结构和减排成本决定了我国不可能过早地承诺减排义务。在相当一段时期内,我国应坚持“节约能源、优化能源结构、提高能源利用效率”的能源政策,但是需要相当的技术和资金作为保证。目前发达国家希望通过“清洁发展机制(CDM)”项目,从发展中国家获得减排抵消额。这将为发展中国家获得新的投资和技术转让带来机遇。

我国党和政府对气候变化问题一直非常重视,早在 1986 年就成立了国家气候委员会,其职责是参加国际有关组织相应的活动,并在开展气候研究、预报、服务等工作中,负责对外的国际合作、交流,对内起到组织协调的作用,并与各有关部门共同协商、配合工作,充分发挥各有关单位的积极性,使气候科学更好地为国家建设服务。1995 年成立了国家气候中心,专门从事气候监测、预测和评价等工作,为我国经济建设和社会发展提供了卓有成效的服务。目前,气候变化与生态环境问题已引起党和政府的高度关注。但是总体来看,迄今为止我国还未把适应与减缓气候变化影响的问题真正提上议事日程,这方面的研究仍十分薄弱和不足。由于全球气候变暖可能给我国自然生态系统和社会经济部门带来难以承受的、不可逆转的、持久的严重影响。因此,应对全球气候变暖的影响,趋利避害,应成为我国实施可持续发展时必须重视的问题之一。需要全面深入研究气候变化对我国自然生态系统和国民经济各部门的影响后果、可采取的适应与减缓措施,并在对其进行成本-效益分析的基础上,提出我国适应与减缓气候变化影响的规划和行动计划。

为了宣传和普及气候和气候变化方面的科学知识,提高公众在全球变化问题上的科学认识,我们组织编撰出版这套《全球变化热门话题》丛书。本套丛书一共 18 册,由国内相关领域的知名专家撰稿,内容包括以下三方面:一是以大量监测数据为基础,揭示全球变化的若干事实及其在各个分系统中的表现形式;二是以太阳

辐射、大气化学、大气物理、环境和生态演变等多学科交叉理论为基础,深入浅出地阐述气候变化的成因;三是以可持续发展理论为指导,提出人类适应和减缓全球变化的各种对策、途径和方法。该丛书的出版,旨在使人们对全球变化有清醒而全面的科学认识,从而更加关注全球变化,并且在更高的层次上、更广泛的范围内认识我国在全球变化中的地位和作用,自觉参与人类社会的共同决策,保护人类赖以生存的地球环境。

国家气候委员会主任

中国气象局局长

秦大河

2003年3月23日

目 录

第一章 碳循环与气候变化	(1)
碳循环与二氧化碳	(1)
CO₂ 与气候变化	(5)
CO ₂ 与大气.....	(9)
CO ₂ 与海洋.....	(11)
CO ₂ 与陆地生态系统.....	(12)
温室效应的环境效应	(15)
海平面.....	(15)
陆地与海洋.....	(15)
人类健康与生态.....	(17)
未知碳汇及其原因	(17)
第二章 全球碳循环	(21)
全球碳库	(22)
大气碳库.....	(24)
海洋碳库.....	(26)
陆地碳库.....	(28)
岩石圈中的碳.....	(30)
人类活动对全球碳循环的影响	(31)
矿物燃料的燃烧.....	(32)
土地利用方式的改变.....	(32)
气候对碳收支的影响.....	(37)

小结	(44)
第三章 陆地碳通量观测方法	(47)
箱式法	(47)
静态箱式法	(47)
动态箱式法	(48)
微气象法	(48)
涡相关法	(48)
能量平衡法	(49)
空气动力学法	(49)
质量平衡法	(49)
化学法	(50)
碱液吸收法	(50)
第四章 陆地碳通量特征	(51)
土壤呼吸作用和全球碳循环	(51)
土壤呼吸作用	(52)
大气 CO_2 和全球温度升高对土壤呼吸作用的影响	(54)
碳截留和免耕作对土壤呼吸作用的影响	(56)
小结	(57)
CO_2 通量	(58)
森林 CO_2 通量特征	(58)
草地 CO_2 通量特征	(62)
农田 CO_2 通量特征	(67)
CH_4 通量	(67)
森林 CH_4 通量特征	(70)
草地 CH_4 通量特征	(71)
湿地 CH_4 通量特征	(71)
农田 CH_4 通量特征	(74)
一氧化氮	(78)
第五章 全球碳循环的模拟研究	(81)

大气碳循环模型	(82)
动力学模式方法	(83)
统计学方法	(86)
陆地生物圈碳循环模型	(87)
陆地生态系统碳循环模型类型	(95)
陆地生态系统碳循环模型比较	(97)
海洋碳循环模型	(108)
影响水体生态系统碳循环的环境因素	(109)
海洋碳循环模型	(112)
耦合大气环流模式的碳循环模型	(115)
海气耦合的大气环流模式	(115)
陆气耦合的大气环流模式	(117)
小结	(118)
第六章 全球碳收支	(122)
土壤碳收支	(122)
土壤碳收支估算模式	(124)
中国土壤碳贮量及其区域特征	(128)
土地利用变化对中国土壤碳贮量的影响	(134)
典型生态系统碳收支	(138)
森林生态系统碳贮量和碳收支	(138)
草地生态系统碳收支	(143)
北极陆地生态系统碳收支	(151)
水生生态系统碳收支	(154)
全球碳收支	(159)
第七章 全球碳对策	(162)
全球 CO ₂ 排放	(163)
全球 CO ₂ 排放	(163)
中国 CO ₂ 排放	(166)
碳减排与增汇对策	(169)

4 • 全球碳循环

生物技术..... (171)

能源革新..... (185)

大气污染控制技术..... (186)

参考文献..... (189)

第一章

碳循环与气候变化

碳循环与二氧化碳

与日俱增的资源与环境问题促使科技界、经济界、社会界、政治界等试图从全球的角度来理解人类生存环境的变化以及这种变化对人类发展的影响。自 20 世纪 80 年代中期开始的以国际地圈-生物圈计划(IGBP)为核心的全球变化研究至今已近 20 年,人们深刻地认识到生物地球化学循环是地球科学研究的核心。事实上,地球上的每一个生物化学反应都是以某种形式与生物地球化学循环相联系的,作为地球生物成员之一的人类参与并依赖于这些循环。数量庞大且复杂的生物过程、地质过程和化学过程改变和传输着生物地球化学元素,从而使得地球化学系统有序地工作着,决定着我们的生存环境的化学和物理特性。正因为如此,若要试图了解全球环境变化原因及其对人类生存环境影响,就应该研究全球的生物地球化学循环。

生物地球化学循环及相关概念

生物地球化学循环(biogeochemical cycle)是研究地球上各个库中的生命元素(life elements)——如碳(C)、氧(O)、氮(N)、硫(S)和磷(P)等——的全球或区域循环。通常用循环方法来研究地球上生物地球化学元素在库中的容量和其他外部因子对不同库之间的传输速率的影响。特定元素或组成成分循环的基本特征常常用该研究元素或组成成分在不同库(reservoir)中的含量和它在各个库之间的流动来描述。所谓库,又称盒(box)或分室(compartment),是指以某一物理、化学或生物特征定义的大量物质。比如,对于海洋、大气与陆地之间的水分循环过程,海洋、大气中的水分和地下水等都是库。当定义了库的边界后,通常将库中具体元素的容量作为库的强度。而单位时间从一个库传输到另一个库的物质质量称之为通量(flux)。例如,海洋表面的水分蒸发率、平流层的一氧化二氮(N_2O)的氧化率(从大气的 N_2O (氮库)流进平流层 NO_x (氮库))、海洋沉积物中的磷沉积率。在更具体的传输过程研究中,通常将通量定义为单位时间单位面积传输的物质数量。为区分这两个概念,通常将后者定义为通量密度(flux density)。

碳素是地球上生命有机体的关键成分,它区别于其他生命必需元素的特点之一是碳原子具有形成长的共价链和环的能力,从而形成了有机化学与生物化学的基础。在漫长的地质时期,植物对碳素的固定是大气中产生氧气(O_2)的近乎惟一的来源,决定了整个地球环境的发展趋势。通过氧化还原反应,其他元素循环与碳循环和 O_2 紧密相联。因此,碳循环是生物圈健康发展的重要标志。

碳以二氧化碳(CO_2)、碳酸盐及有机化合物等形式在不同的源——大气、海洋、陆地生物界和海洋生物界——之间循环。在地质时间尺度上,碳循环还包括沉积物和岩石之间的循环(图 1.1)。人类从食物中摄取的碳水化合物被吸入的 O_2 氧化后,以 CO_2 的方式通过呼吸作用排出;矿物燃料燃烧、木材腐烂和土壤及其他有机物的分解亦向大气释放 CO_2 。抵消这种将碳转化为 CO_2 的过程

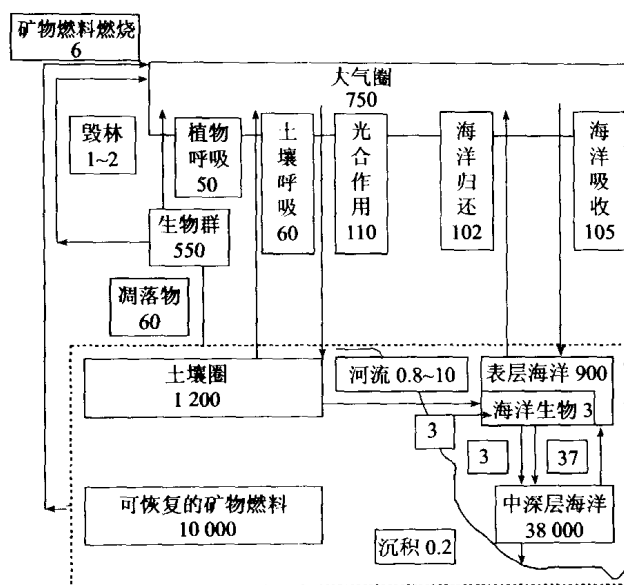


图 1.1 全球碳循环

(框内数值单位:GtC;通量(箭头)单位:GtC · a⁻¹)

(改自 Berrien 和 Braswell,1994)

则是植物的光合作用。植物通过光合作用从大气圈中吸收 CO_2 合成有机物质,并向大气中释放 O_2 。最大的自然碳交换通量发生在大气与地球生物界,以及大气与海洋表层之间。相比之下,矿物燃料的燃烧向大气的净输入以及森林消失的影响就非常小,但仍大得足以缓解碳的自然平衡。大气中 CO_2 含量与其通量之比作为 CO_2 在大气中的流通时间大约为 4 年,也就是说,大气中 CO_2 分子平均每过几年时间就会被植物吸收或海洋溶解。但是,不要把这个短时间尺度与大气中 CO_2 水平因源和汇的变化而适应到一个新的平衡所需要的时间混为一谈,这个适应时间尺度大约为 50~100 年的量级,相当于 CO_2 在大气中的存留时间。 CO_2 在大气中的流通时间主要取决于大洋表层与深层之间缓慢的碳交换,对于全

球变暖趋势十分重要。这是因为地球上的气候依赖于大气的辐射平衡,而大气的辐射平衡又依赖于入射的太阳辐射以及大气中辐射性活跃的微量气体,如温室气体、云和气溶胶的多少。 CO_2 作为一种受人类活动影响的温室气体有着最大的增温效应,据估计,大气中 CO_2 在整个温室气体中的作用占一半以上。

全球碳循环发生于大气、海洋和陆地之间(图 1.1)。大气圈的碳贮量约 750 GtC;陆地生物圈的总碳贮量约 1 750 GtC,其中植被碳贮量约 550 GtC,土壤碳贮量约 1 200 GtC;海洋圈中生物群的碳贮量约 3 GtC,溶解态有机碳约 1 000 GtC,溶解态无机碳 3 400 GtC。这表明陆地与海洋中储存的碳远远多于大气。据估计,全球陆地生态系统的碳贮量有 46%在森林中,23%在热带及温带草原中,其余的碳贮存在耕地、湿地、冻原、高山草地和沙漠半沙漠中。可见,森林和草原生态系统的碳贮量占全球陆地生态系统碳贮量的 69%,在陆地生态系统碳循环中起着十分重要的作用。这些大碳库的微小变化将会对大气 CO_2 浓度造成很大的影响。例如,贮存在海洋中的碳,只要释放 2%就将导致大气中的 CO_2 浓度增加 1 倍。

以 CO_2 形式进出大气的碳输送量是很大的,约占大气中总碳贮量的 1/4,其中的一半与陆地生物群落交换。陆地植物群落通过光合作用从大气中固定的 CO_2 约 $110 \text{ GtC} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 $50 \text{ GtC} \cdot \text{a}^{-1}$ 以呼吸作用的形式释放到大气中,余下的 $60 \text{ GtC} \cdot \text{a}^{-1}$ 以凋落物的形式进入土壤,并最终土壤呼吸的形式释放到大气中。矿物燃料燃烧向大气中释放的 CO_2 约 $6 \text{ GtC} \cdot \text{a}^{-1}$,毁林引起的 CO_2 释放约 $1 \sim 2 \text{ GtC} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

不同碳库之间的碳交换时间尺度相差很大,从数百万年的地壳运动过程至一天甚至分秒时间尺度的大气-海洋之间的气体交换过程和植物的光合作用过程。一般来说,这些时间尺度远大于单个 CO_2 分子在大气中度过大约 4 年的平均时间。这意味着大气 CO_2 浓度发生波动后,其恢复到平衡状态时所需要的时间将不相