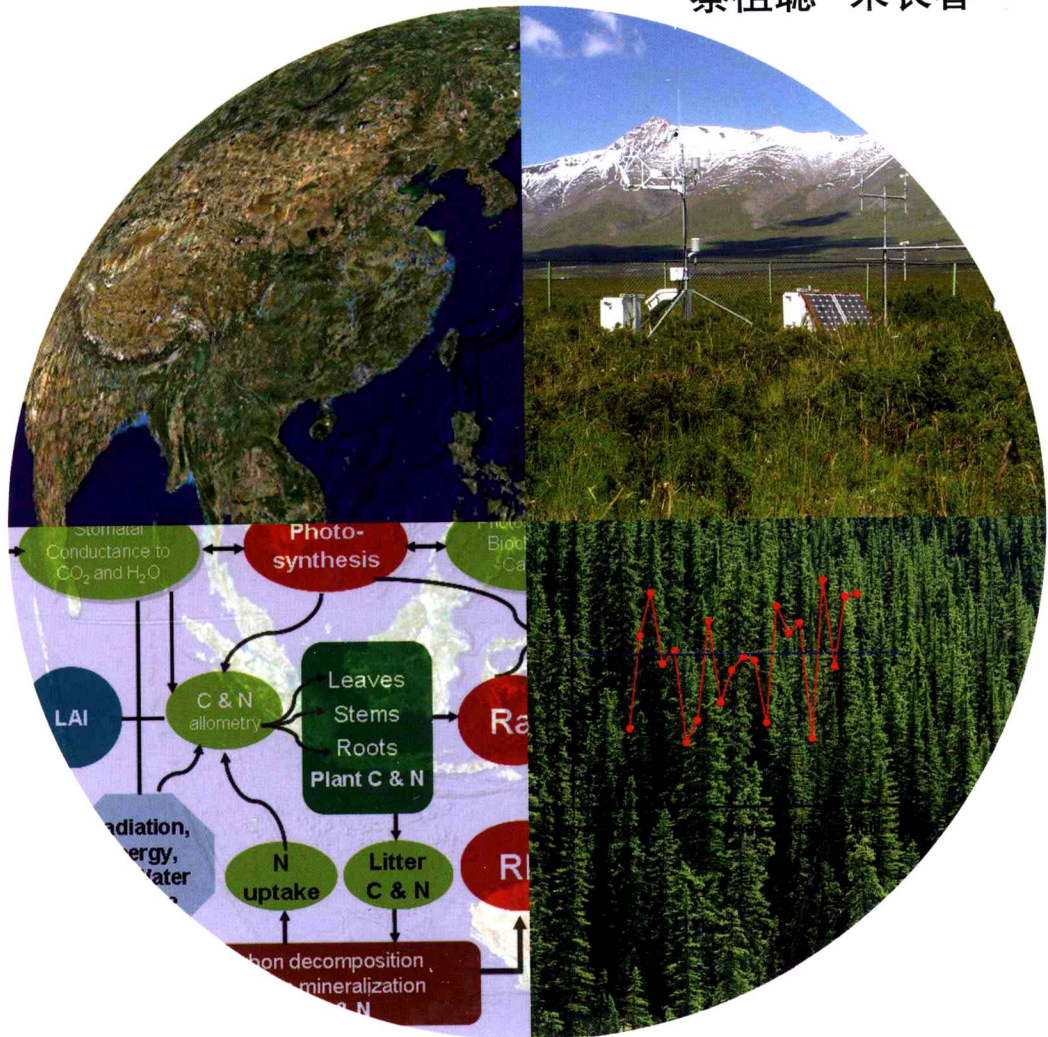


中国科学院知识创新工程重大项目  
“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”系列专著

# 中国陆地生态系统碳循环的 生物地球化学过程

韩士杰 董云社 等著  
蔡祖聪 宋长春



## 内 容 简 介

本书系中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”成果之一。书中对我国典型生态系统类型（森林、草地、农田和湿地）碳循环生物地球化学过程的基本规律、驱动力机制，以及各生态系统碳收支现状与潜力进行了系统研究。

本书可供地球化学、地理学、土壤学、气象学、环境学、生态学、生物学、大气科学和全球变化等专业的科研、教学人员及大学生、研究生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程/韩士杰等著. —北京: 科学出版社, 2008

(中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”系列专著)

ISBN 978-7-03-020114-0

I. 中… II. 韩… III. 陆地-生态系统-碳循环-生物地球化学-研究-中国 IV. P9 X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 159355 号

责任编辑: 胡晓春 吴伶俐/责任校对: 陈丽珠

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100010

http://www.sciencep.com

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008 年 3 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2008 年 3 月第一次印刷 印张: 25.374

印数: 1—1500 字数: 587 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换 (科印))

中国科学院知识创新工程重大项目

“中国陆地和近海生态系统碳收支研究” (KZCXI-SW-01)

资助

# 序 一

众所周知，在人类社会日益关注全球环境问题的今天，大气中二氧化碳和甲烷等温室气体浓度升高诱发的全球气候变化已成为世界经济可持续发展和国际社会所面临的最为严峻的挑战。为了应对这个挑战，国际社会采取了一系列重大行动。1992年在巴西里约热内卢召开了联合国环境与发展大会，签署了《联合国气候变化框架公约》，1997年12月在日本东京通过了著名的《京都议定书》等，试图通过人类社会的共同努力，将大气二氧化碳稳定在某一个水平上，规避其可能给人类社会带来的重大负面影响。

从科学的角度看，二氧化碳和甲烷等温室气体浓度升高诱发的全球气候变化尚存在诸多不确定性。全球碳循环是其中的重要方面，它控制着大气二氧化碳浓度的变化。为此，国际地圈生物圈计划（IGBP）、国际全球环境变化人文因素计划（IHDP）、世界气候研究计划（WCRP）以及国际生物多样性计划（DIVERSITAS）联合发起了以全球碳循环为主要研究内容的全球碳计划（GCP），该计划的实施极大地推动了全球碳循环与气候变化科学的发展。

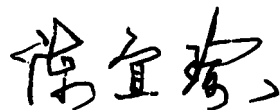
中国地域广阔，陆地和近海生态系统复杂多样，拥有自寒温带至热带的气候带和特殊的植物地理区域，为研究全球碳循环提供了良好的实验平台。同时，我国的社会经济正处在高速发展阶段，这为研究世界经济发展对全球碳循环和气候变化的影响提供了难得的社会经济背景。

我国的碳循环研究起步较晚，但起点较高、发展迅速。2001年中国科学院启动了知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”，共有18个研究所（中心、植物园）和中国生态系统研究网络（CERN）的400余名科研人员参与了该项研究。通过为期5年的研究，该项目取得了一系列研究成果，主要包括：构建了ChinaFLUX研究平台、中国碳循环数据信息系统、中国陆地和近海生态系统碳循环模型和模型集成系统；初步明确了驱动生态系统碳循环过程的关键气候因子、生物学因子和人类活动的影响；初步明确了中国陆地和近海生态系统碳源汇时空格局及其对气候变化的响应，并评价了不同技术措施下中国陆地生态系统碳增汇潜力等。这些研究成果是迄今为止对中国陆地和近海生态系统碳收支较为全面的认识，对我国制定碳管理策略和参与气候公约谈判具有重要的参考价值。本系列专著是对

上述研究成果的全面总结，是国内首部关于中国陆地和近海生态系统碳收支研究的系统性学术著作。本系列专著的出版不仅展示了中国学者在该领域的最新研究成果，而且对推动我国全球变化科学、生态学、气候学、土壤学、地理科学、海洋科学和遥感科学等学科的发展具有重要意义。

本系列专著的作者们是活跃在我国碳循环与全球变化研究领域的中青年学者。我十分欣慰地看到他们正在成长，也赞赏他们那种刻苦钻研、勇于探索的科学精神。一分耕耘，一分收获。希望他们继续努力，将我国生态系统碳循环与全球变化研究推向新的高度，取得更多、更大的进展。

国家自然科学基金委员会主任  
中国科学院院士



2007年6月于北京

## 序 二

近百年来，以全球变暖为主要标志的气候变化对世界经济、社会和生态环境等产生了重大影响，严重威胁着各国经济的可持续发展和国家安全。地球系统碳循环是连接诸如温室气体、全球变暖和土地利用等重大全球变化问题的纽带，是在更高层次上推进学科交叉和综合集成的切入点。对全球和区域碳循环的深入研究不仅可为认识和控制全球气候变化提供理论基础，而且有助于制定生态系统管理策略以适应和减缓气候变化的影响。

为了在区域和国家尺度上回答与中国陆地和近海生态系统碳循环相关的科学问题，中国科学院于2001年启动了知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”，共有18个研究所（中心、植物园）（地理科学与资源研究所、大气物理研究所、海洋研究所、遥感应用研究所、沈阳应用生态研究所、植物研究所、南京土壤研究所、东北地理与农业生态研究所、南京地理与湖泊研究所、水生生物研究所、寒区旱区环境与工程研究所、亚热带农业生态研究所、生态环境研究中心、成都山地灾害与环境研究所、新疆生态与地理研究所、西北高原生物研究所、华南植物园、西双版纳热带植物园）和中国生态系统研究网络（CERN）的400余名科研人员（包括研究生和博士后）参与了该项研究。该项目的总体目标是以回答科学问题为中心，着眼于为我国社会经济的可持续发展和履行有关国际公约服务。试图通过对中国陆地和近海生态系统碳收支时空格局、碳循环过程和模型、生态系统碳收支对全球变化的响应以及碳增汇、减排技术的系统研究，阐明中国陆地和近海生态系统碳收支的系列科学问题，提高我国在国际全球变化研究领域中的学术地位，为全球变化背景下的中国社会经济的可持续发展以及生态系统的管理提供科学依据，为履行有关国际公约提供基础数据。

经过为期5年的研究工作，该项目在以下4个方面取得了重要进展：

1) 构建了ChinaFLUX研究平台、中国碳循环数据信息系统、中国陆地和近海生态系统碳循环模型和模型集成系统。ChinaFLUX的建成，有力地推动了我国生态系统碳通量观测和碳循环的研究，为我国深入开展陆地生态系统物质循环和区域气候响应等研究提供了平台。中国陆地和近海生态系统碳循环模型和模型集成系统实现了多个点尺度模型在同一平台上的模拟，为估算国家尺度的碳收支状况提供了基础。

2) 研究了驱动我国陆地和近海生态系统碳循环过程的关键气候因子、生物学因子和人类活动影响, 其成果是迄今为止对不同生态系统碳循环过程较为全面的认识。通过对详尽的历史资料的收集、整理和分析, 重新估算了过去 300 年间中国土地利用变化导致的陆地生态系统向大气释放的碳总量, 对正确评价我国历史时期土地利用、土地覆被变化对陆地碳收支的影响具有积极意义。

3) 初步明确了中国陆地和近海生态系统碳源汇时空格局及其对气候变化的响应, 并得到如下重要结果: 过去 20 年中国陆地生态系统碳汇区主要分布在华北、华东、华中、东北及西南大部分地区, 碳源区主要分布在西北大部分地区、内蒙古西部等地区, 国家尺度上总体为碳汇; 中国农田土壤具有明显的碳汇功能; 林业工程实施将在未来 50 年内显著增加林木碳储量等。这些研究结果对客观认识我国生态系统的碳汇功能、制定碳管理策略和气候公约谈判策略具有重要价值。

4) 初步评价了不同技术措施下中国陆地生态系统碳增汇潜力, 相关研究结果可为我国参与气候变化谈判提供参考依据。

本系列专著是研究项目组成员对上述研究成果的系统总结, 包括了 8 本各自独立, 但又相互呼应的学术著作。分别为: 《中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征》(于贵瑞、孙晓敏)、《中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测》(王跃思、王迎红等)、《碳循环遥感基础与应用》(牛铮、王长耀等)、《过去三百年中国土地利用变化与陆地碳收支》(葛全胜、戴君虎、何凡能等)、《中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程》(韩士杰、董云社、蔡祖聪、宋长春等)、《中国近海与湖泊碳的生物地球化学》(宋金明、徐永福、胡维平、倪乐意等)、《中国陆地生态系统碳收支模型》(黄耀、周广胜、吴金水、延晓冬等) 和《中国陆地生态系统碳收支与增汇对策》(陈泮勤、王效科、王礼茂等)。

出版本系列专著的主要目的是向读者系统地展示该项目所获得的最新研究成果, 并对未来的发展方向和研究重点进行评述, 为读者提供系统性的科学资料和理论知识, 以推动我国地球系统碳循环及相关学科的发展。我们衷心感谢项目组全体成员在这 5 年中的良好协作和辛勤努力, 并期望在未来的科研活动中能取得更大的突破。

“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”项目首席科技专家

黄 耀 于贵瑞

2007 年 6 月于北京

# 前 言

本书是在中国科学院知识创新工程重大项目经费支持下，历时 5 年研究而完成的。书中就我国典型生态系统类型（森林、草地、农田和湿地）碳循环生物地球化学过程的基本规律、驱动力机制及涉猎的生态系统碳收支的研究展望进行了系统研究与阐述，是一部科学认识我国典型陆地生态系统碳收支现状与潜力的、科学性强和现代技术明显的能够用于指导陆地生态系统碳循环生物地球化学过程研究的参考书。

本书的第一章由中国科学院沈阳应用生态研究所韩士杰研究员执笔，参加编写的主要人员有李雪峰博士、张军辉博士、郭忠玲教授、刘颖博士；第二章由中国科学院地理科学与资源研究所董云社研究员执笔，参加编写的人员有齐玉春、耿元波；第三章由中国科学院南京土壤研究所蔡祖聪研究员执笔，参加编写的人员有李忠佩、杨兰芳、孟磊、尹云锋；第四章由中国科学院东北地理与农业生态研究所宋长春研究员执笔，参加编写的人员有王毅勇、于君宝、张金波、王德宣、赵志春、张丽华、徐小峰、杨继松、杨文燕。全书由韩士杰研究员统稿，胡艳玲博士对本书的图文进行校验。

在研究过程中曾得到中国科学院生态系统研究网络相关台站和相关主管研究所的鼎力支持，项目自设计至结题一直得到项目经理陈泮勤研究员、项目首席科技专家黄耀研究员和于贵瑞研究员的支持，在此表示感谢！

韩士杰 董云社 蔡祖聪 宋长春 等

2007 年 3 月



# 目 录

序一

序二

前言

## 第一章 森林生态系统碳循环生物地球化学过程——以阔叶红松林森林生态系统为例

.....	1
第一节 森林生态系统碳循环的生物地球化学过程特征和机理 .....	2
一、森林生态系统碳循环的过程特征 .....	2
二、森林生态系统碳循环的机理 .....	7
第二节 长白山阔叶红松林群落的光合作用 .....	8
一、阔叶红松林主要树种的光响应过程特征 .....	9
二、CO <sub>2</sub> 浓度对阔叶红松林主要树种光合速率的影响 .....	10
第三节 土壤的呼吸过程 .....	11
一、土壤呼吸 .....	12
二、倒木呼吸 .....	33
三、阔叶红松林典型树种树干呼吸的研究 .....	38
第四节 森林生态系统碳分配格局及动态 .....	42
一、研究方法 .....	42
二、研究结果 .....	45
三、讨论 .....	46
第五节 森林凋落物 .....	47
一、森林凋落量 .....	48
二、环境因子对森林凋落量的影响 .....	56
三、凋落物分解研究 .....	62
四、不同研究区凋落物分解率的变化规律 .....	68
五、影响凋落物分解的主因素分析 .....	73
六、阔叶红松林内红松针叶的分解特征 .....	77
第六节 森林生态系统生物-土壤-大气碳交换耦合过程 .....	83
一、实验地的气候与水文状况 .....	84
二、实验地的植被与土壤状况 .....	85
三、结果与讨论 .....	85
第七节 气候变化对森林生态系统碳蓄积和碳循环的影响 .....	88

一、全球变化对凋落物分解的影响 .....	90
二、全球变化对中国凋落物分解的影响 .....	90
第八节 影响森林生态系统碳收支的主要因素 .....	91
一、基于涡度相关方法对森林碳通量的估算 .....	92
二、全年碳收支及季节动态 .....	98
第九节 森林生态系统碳增汇潜力 .....	101
一、中国森林生态系统碳源、碳汇强度的现实空间分布格局 .....	101
二、土地利用和森林经营活动对生态系统碳增汇潜力的影响 .....	118
第十节 目前研究中存在的主要问题及未来研究方向展望 .....	125
一、中国森林生态系统碳收支研究存在的主要问题 .....	125
二、中国森林生态系统碳收支的研究展望 .....	128
参考文献 .....	131
<b>第二章 草地生态系统碳循环过程研究 .....</b>	<b>146</b>
第一节 研究区域概况和主要的研究方法 .....	149
一、研究区域概况 .....	149
二、主要研究方法 .....	156
第二节 温带草地生态系统碳、氮气体循环过程 .....	161
一、草地呼吸过程碳循环特征 .....	162
二、草地 CH <sub>4</sub> 氧化吸收过程碳循环特征 .....	175
三、草地 N <sub>2</sub> O 气体通量特征 .....	185
第三节 温带草原土壤-植被系统碳素和氮素密度及主要循环过程 .....	193
一、锡林河流域草地土壤亚系统碳素密度及空间分布 .....	195
二、温带草地植被亚系统碳素和氮素密度 .....	201
三、锡林河流域草原土壤、植被亚系统碳、氮元素的周转 .....	202
四、草地生态系统碳、氮元素耦合关系初探 .....	211
第四节 自然环境要素对草地生态系统碳、氮循环过程的影响 .....	215
一、水热因子对草地土壤碳、氮密度变化与分布规律的影响 .....	215
二、水热因子对草地碳、氮气体通量的影响及其协同作用分析 .....	217
三、土壤中碳、氮元素的含量及分布对温带草地碳、氮气体过程的影响 .....	229
第五节 人类活动对温带草地碳、氮元素密度与碳、氮气体排放和吸收的影响 .....	233
一、放牧对温带草地碳、氮气体排放和吸收过程的影响 .....	233
二、农垦对温带草地碳、氮气体排放和吸收过程的影响 .....	239
三、农垦和放牧对草地土壤碳密度的影响 .....	246
第六节 目前研究中存在的主要问题及未来研究方向展望 .....	247
参考文献 .....	248
<b>第三章 农田生态系统碳生物地球化学循环过程 .....</b>	<b>258</b>

第一节 农田土壤呼吸 .....	259
一、土壤呼吸的变化规律 .....	260
二、光合作用产物对土壤呼吸的作用 .....	266
三、作物产量与土壤呼吸的关系 .....	270
四、土壤性质和环境条件对土壤呼吸的影响 .....	272
第二节 农田土壤有机碳结合形态之间的相互关系及意义 .....	277
一、土壤有机碳的结合形式 .....	277
二、农田土壤轻组有机碳和重组有机碳之间的相互关系 .....	279
三、土壤有机碳结合形态与矿化的关系 .....	283
第三节 农田土壤有机碳含量的主要影响因素 .....	287
一、利用长期试验资料计算土壤平衡有机碳含量 .....	288
二、土壤有机碳含量与作物产量的关系 .....	290
三、土壤利用方式对有机碳含量的影响 .....	292
四、秸秆还田对增加土壤有机碳含量的作用 .....	294
五、耕作方式与土壤有机碳含量的关系 .....	296
第四节 我国东部地区农田土壤有机碳含量变化 .....	297
一、东部主要农田土壤有机碳的循环特征 .....	297
二、我国东部主要农田土壤有机碳库的平衡状况分析 .....	302
三、亚热带地区水稻土有机碳的平衡值及固碳潜力 .....	303
第五节 我国农田土壤有机碳含量变化趋势 .....	307
一、近 20 年来我国农田土壤有机碳含量变化 .....	307
二、亚热带水稻土的固碳潜力 .....	308
三、我国农田土壤有机碳储量变化趋势分析 .....	309
第六节 目前研究中存在的主要问题及未来研究方向展望 .....	310
参考文献 .....	312
<b>第四章 湿地生态系统碳循环的主要生物地球化学过程 .....</b>	<b>321</b>
<b>第一节 湿地碳的生物地球化学 .....</b>	<b>321</b>
一、湿地碳的生物地球化学循环 .....	321
二、气候变化与湿地碳过程 .....	322
三、人类活动与湿地碳循环 .....	323
四、湿地碳的微生物过程 .....	326
五、中国湿地分布概况 .....	327
<b>第二节 湿地碳的累积与分解过程 .....</b>	<b>328</b>
一、沼泽湿地碳的累积过程 .....	328
二、沼泽湿地碳的分解过程 .....	334
三、沼泽湿地碳过程的主要影响因素分析 .....	341
四、湿地碳排放及影响因子 .....	350

---

五、季节性冻融与湿地碳排放 .....	366
六、沼泽湿地垦殖对土壤碳过程的影响 .....	370
七、氮素输入影响下湿地碳过程变化 .....	378
第三节 目前研究中存在的主要问题及未来研究方向展望 .....	383
参考文献 .....	385

# 第一章 森林生态系统碳循环生物地球化学过程

## ——以阔叶红松林森林生态系统为例

大气、水体和土壤等环境中的营养物质通过绿色植物吸收进入生态系统,被其他生物体重复利用,最后归还于环境中,这些归还的物质又再一次被绿色植物吸收,再次进入生态系统,这种物质的反复传递和转化过程,称为物质循环(material cycle)。如果这些物质的循环经历沉积或矿化过程,就称为生物地球化学循环(biogeochemical cycle),简称生物地化循环。

物质循环可以用库、流通率、周转率和周转时间等概念来描述。物质在环境中都存在一个或多个贮存场所,这些贮存场所就称为库。如碳在大气中的数量是一个库,在生物体内的数量又是一个库。根据库的容量以及各种物质在各库中的滞留时间和流动速度的不同,可以将库分为两种:一种是贮存库,其特点是库容量大,元素在库中滞留时间长,流动速度慢,多属于非生物成分;另一种是交换库,又叫做循环库,其特点是库容量小,元素在库中滞留时间短,流动速度快,多属于生物成分。

在生态系统中,单位时间、单位面积(或体积)内通过的营养物质的数量,叫做流通率。物质出入一个库的流通率占该库中营养物质总量的比例叫做周转率。一个库中全部营养物质更换一次所需要的时间,叫做周转时间。周转时间是周转率的倒数。其计算方法如下:

$$\text{周转率} = \frac{\text{流通率}}{\text{库中营养物质总量}}$$

$$\text{周转时间} = \frac{\text{库中营养物质总量}}{\text{流通率}}$$

地球上最大的两个碳库是岩石圈和化石燃料,其含碳量约占地球上碳总量的99.9%。这两个库中的碳活动缓慢,实际上起着贮存库的作用。地球上还有三个碳库,即大气圈库、水圈库和生物库。这三个库中的碳在生物和无机环境之间迅速交换,容量小而活跃,实际上起着交换库的作用(图 1.1)。

碳,在岩石圈中主要以碳酸盐的形式存在,总量约  $2.7 \times 10^{16}$  t;在大气圈中以二氧化碳和一氧化碳的形式存在,总量约  $2 \times 10^{12}$  t;在水圈中则以多种形式存在。在生物库中则存在着几百种被生物合成的有机物,这些物质的存在形式受到各种因素的调节。

大气中,二氧化碳是含碳的主要气体,也是碳参与物质循环的主要形式。在生物库中,森林是碳的主要吸收者,它固定的碳相当于其他植被类型的 2 倍。森林又是生物库中碳的主要贮存者,贮存量大约为 482Gt,相当于目前大气含碳量的 2/3。植物通过光合作用从大气中吸收碳的速率,与通过动、植物的呼吸和微生物的分解作用释放碳到大气中的速率大体相等。因此,大气中二氧化碳的含量在受到人类活动干扰以前是相当稳定的。

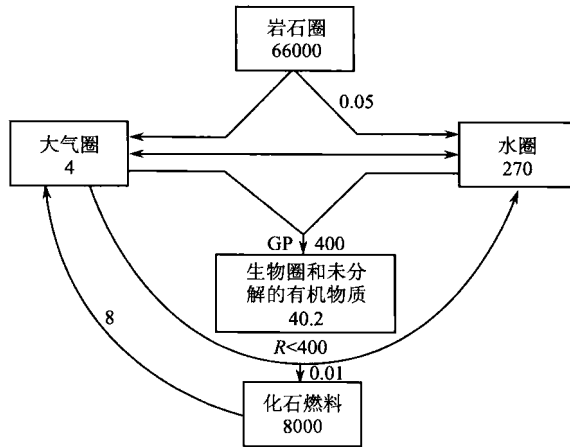


图 1.1 碳的全球性循环(引自戈峰,2002)

库(方框内)的单位为  $\text{kg}/\text{m}^2$ ; 流通量(框外)的单位为  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

多数生态系统内生物和化学元素的交换大体处于平衡状态。例如,碳和氧的再循环是由光合作用和呼吸相互补充;氮、磷和硫是通过生态系统更复杂的途径及借助于专性代谢能力的微生物达到平衡状态。为了说明生态系统内部养分元素的动态,将生态系统分为活有机体(或活生物量)、死有机残体(死生物量)和有效无机养分三个分室,大部分养分循环均与这三个活跃的分室有关。此外,参与养分循环的还有间接有效的无机养分和间接有效的有机养分两个分室。生态系统内养分循环的过程,其中动、植物的同化和生产过程使得无机养分向活有机体分室移动。如植物初级生产量的形成,主要是碳、氧、氮、磷和硫循环的过程;动物通过进食和饮水也能同化很多重要元素,如钠、磷和钙等。生物的呼吸作用又将碳和氧直接归还给有效无机养分分室或活有机体分室的草牧食物链再多次循环。大部分因同化进入活有机体的碳和氮,因生物体死亡和排泄物转移到死有机残体分室,这些残体的养分可以通过腐食者再归还到活有机体分室中去,但所有养分最终因淋溶和分解都归还到有效无机养分分室里。间接有效无机养分和间接有效有机养分两分室的养分留存在大气、石灰岩、煤和形成地壳的岩石里,进入养分循环的速度非常缓慢,主要靠地质作用。

## 第一节 森林生态系统碳循环的生物地球化学过程特征和机理

### 一、森林生态系统碳循环的过程特征

与其他植被组成相比,由于树木生活周期较长,形体更大,在时间和空间上均占有较大的生态位置,具有较高的贮存密度,能够长期和大量地影响大气碳库,因此森林生态系统在全球碳循环过程中起着不可替代的重要调控作用。相对于农田、草地、荒漠而言,森

林生态系统碳循环具有涉及环节更多、空间规模更大、循环周期更长、影响范围更广泛等特征。

### (一) 森林生态系统碳循环过程的空间特征

森林生态系统碳循环模式如图 1.2 所示。森林生态系统的碳循环过程关系到光合作用、呼吸作用以及净初级生产力(NPP)在树木不同器官间的分配等多个重要的生态系统过程。这些过程几乎与所有的环境因子,如气候、养分及水分等有关,同时还受到大气  $\text{CO}_2$  浓度和 N 沉降的影响(Waring *et al.*, 1998)。

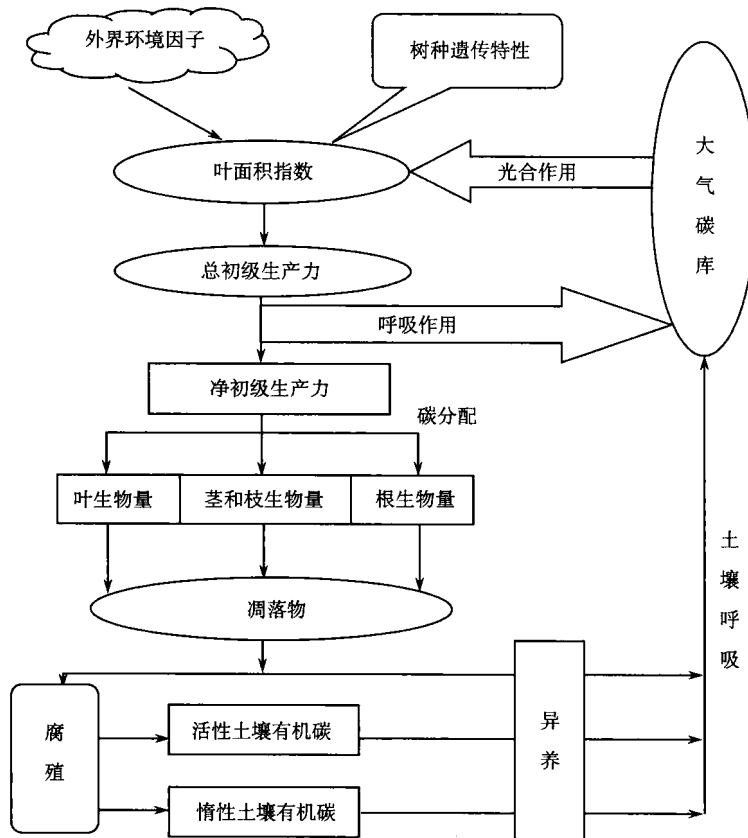


图 1.2 森林生态系统碳循环模式(引自汪业勳,1999)

森林生态系统的碳循环过程涉及的碳库大致可以分为森林植被碳库、森林土壤碳库和大气碳库。森林植被碳库与大气碳库之间的碳交换通过树木的光合作用和呼吸作用进行。目前,人们对光合作用的研究较为充分和准确,而呼吸作用,尤其是与土壤相关的研究结论不确定性较大。呼吸,分为自养呼吸和异养呼吸两大类。其中自养呼吸又可以再分为维持呼吸和生长呼吸两大类,可以通过对根、茎和叶等不同器官呼吸强度的测定来了解;异养呼吸是指生活于树木体表的微生物的呼吸作用。由于森林植被是个巨大的非均

匀系统,每个个体及每个个体的不同器官以不同的速率进行着呼吸作用,以及森林本身的生物学特征(年龄、生长状况等)和环境因子(温度、湿度、光照等)等造成呼吸强度的空间异质性,导致呼吸作用尤其是异养呼吸是森林碳循环过程中较难准确测定和模拟的部分。森林植被碳库与森林土壤碳库之间的碳交换主要通过叶、茎、根、果实等器官的凋落以及腐殖化进行,而森林土壤碳库和大气碳库之间的碳交换通过森林土壤微生物的呼吸、土壤有机质分解等过程实现。此外,森林生态系统碳循环过程也应包括消费者——森林动物碳库,依赖于植物生物量为食的森林动物无疑影响到森林植被碳库的变化,如松毛虫对叶片以及松鼠对栎树果实的取食等,但是由于人们目前对森林动物碳库的变化的影响还难以定量,所以,很多时候只有忽略森林动物碳库的影响。

森林生态系统碳蓄积过程在巨大的空间范围内以很高的速率进行,其规模超出了其他类型的植被生态系统。

森林是陆地表面一种主要的植被类型,约占陆地面积的 1/3。森林碳储量占全球陆地生态系统碳储量的 92.5% (Whittaker and Likens, 1973)。根据 Whittaker 和 Likens (1975)的资料,每年每平方米森林净光合固定的碳量:热带森林为 450~600g,温带森林为 270~1125g,寒温带森林为 180~900g,耕地为 45~2000g,草原为 130g。单位面积森林的贮碳量为农田的 20~100 倍(徐德应、刘世荣,1992)。

森林生态系统类型复杂多样,各种类型的生态系统虽然在碳循环机理过程上具有相似性,但光合产量、呼吸和分解速率以及碳储量却有较大差异。Olson 在 1974 年对世界主要森林生态系统内植物活碳总量、净第一性生产量的碳量以及每年碳的归还量进行了归纳(表 1.1)。从表 1.1 中可以看出,森林、林地每年净初级生产量为 59.37Gt C,其中尤

表 1.1 主要森林生态系统的净初级生产量、碳总量和归还量

主要生态系统	净初级生产量 <sup>a</sup> /(Gt C/a)	活碳总量/(Gt C)	归还量 <sup>b</sup> /(Gt C/a)
寒带泰加林地	3.33	121.80	0.0275
亚寒带森林,林地	1.93	64.12	0.0301
寒温带,山地针叶林	2.08	68.38	0.0304
寒温带落叶阔叶林为主	2.09	67.88	0.0308
暖温带阔叶林为主	4.05	97.76	0.0414
暖温带湿地	2.97	10.32	0.2878
暖带山地、林地(半干旱)	2.40	24.80	0.0968
暖带湿地(干旱至半干旱)	3.14	12.82	0.2449
热带肥沃湿地(干旱至半干旱)	0.79	2.66	0.2970
热带灌丛、稀树草原	10.52	139.13	0.0756
热带山地森林	4.08	99.62	0.0410
热带低山雨林	11.17	83.86	0.1331
其他热带森林	10.82	216.26	0.0500
共计	59.37	1009.41	1.3864 <sup>c</sup>

a. 相当于初级生产量减去绿色植物所有部分(包括束缚在一切活植物体中的碳)的碳呼吸量。

b. 每年从活碳总量变成死的有机物质的损失量。

c. 归还量共计值不是单个数值相加计算的,因为平均计算出来的合计值是用每个生态系统总量大小加权计算而得。



以热带森林、林地的生产量为高；各类森林的活碳总量为 1009.41Gt，森林（包括泰加林、阔叶林、雨林等）的活碳量较高，湿地的活碳量较低；归还量则以湿地和雨林系统较高，寒带泰加林归还量最低。

据统计，我国森林生态系统总碳库为 28.116Gt，其中土壤碳库为 21.023Gt，占总量的 74.8%；植被碳库为 6.200Gt，占总量的 22.0%；凋落物层的碳储量为 0.892Gt，占总量的 3.2%（周玉荣等，2000）。

## （二）森林生态系统碳循环过程的时间特征

由于各种外部环境条件的影响，森林生态系统处于三种不同的演替状态之一，即进展状态、退化状态和稳定状态，分别对应不同的碳的吸收能力和贮存能力。进展演替的生态系统，由于结构复杂性、生物多样性和生物量积累的增加，将会吸收更多的碳贮存在生态系统中；退化演替的生态系统正好相反；稳定状态的森林生态系统由于达到了演替顶级，它具有最大的碳储量，但由于森林生态系统的碳固定量和分解量处于平衡状态而不再吸收更多的碳。

森林生态系统的碳蓄积包括以下几个主要过程：总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)、净生态系统生产力(NEP)和净生物群系生产力(NBP)。如图 1.3 所示，植物通过光合作用同化  $\text{CO}_2$  形成 GPP；由于植物自身呼吸消耗部分有机物并释放  $\text{CO}_2$ ，剩余的有机物即为生态系统 NPP，NPP 的积累形成森林生态系统的植被生物量碳库；生物量在异养呼吸的作用下分解释放  $\text{CO}_2$ ，剩余的有机物形成生态系统 NEP，它包括了土壤和凋落物层的碳库积累；由于干扰过程，如人类活动及火灾等导致森林生态系统的碳排放，剩余的碳贮存称生物群区 NBP，成为森林生态系统长期的碳贮存。从 GPP 到 NPP，从 NPP 到 NEP，从 NEP 到 NBP，这是一个时间尺度不断加大的过程。

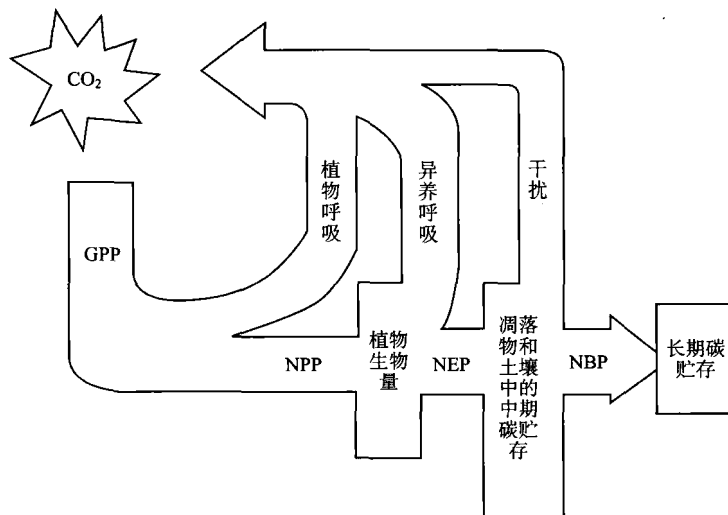


图 1.3 森林生态系统的碳蓄积过程