



华夏英才基金学术文库

林而达 李玉娥 等 编著  
郭李萍 高德明

# 中国农业土壤 固碳潜力与气候变化



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



华夏英才基金学术文库

# 中国农业土壤固碳潜力与气候变化

林而达 李玉娥 等 编著  
郭李萍 高德明

科学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书从农业土壤固存碳和减少温室气体及其前体排放的角度,以丰富的数据、详实的资料和最新的分析方法介绍了气候变化与全球碳平衡、农业温室气体排放与吸收的最新研究进展,并结合作者近年的有关研究,对我国农业土壤固存碳的容量、强度及未来潜力进行综合分析,以期能为政策制定和管理部门提供一些参考和借鉴,并为我国参与联合国有关气候变化谈判及可能执行的气候变化框架公约的有关条款提供科学依据。

本书可供从事全球变化、全球气候变化、农业气象、生态、环境、农业、土壤、林业、草地等领域的研究人员、专业技术人员、教学人员和相关专业的研究生、大学生及从事相关计划、宣传、管理的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国农业土壤固碳潜力与气候变化/林而达等编著. —北京:科学出版社,2005

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 7-03-012504-5

I. 中… II. 林… III. 土壤成分-碳-影响-气候变化-研究-中国  
IV. ①S153.6 ②P461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 113534 号

责任编辑:韩学哲 陈欣然 王 静 / 责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年3月第一次印刷 印张:13

印数:1—1 500 字数:248 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 前 言

20世纪50年代以来,人类活动造成的大气中温室气体浓度的急剧增加以及由此引起的全球气候变化,已成为当代人类面临的严峻考验。为保护全球气候,1992年6月联合国第二次环境与发展大会在巴西里约热内卢召开,全世界166个国家签署了气候变化框架公约(UNFCCC),我国也是签字国之一。由此,1997年12月,京都议定书规定了各附件一国家(15个工业化程度较高的发达国家和经济转轨国家)的温室气体限排减排任务和时间表。公约及议定书的最终目标是要稳定大气中的温室气体浓度,而温室气体排放与能源、农业等经济活动息息相关。虽然公约目前还只对发达国家温室气体的排放作出限制,但美国、日本、欧洲国家等要求我国“自愿承诺减排”的压力越来越大。

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,对收汇和促进调节大气分室中的碳向土壤库中转移起着主要作用,并可减少含氮温室气体从土壤中释放。目前,发达国家已把减排温室气体的主要希望寄托在增加森林和土壤碳汇方面。在当前增加森林面积的潜力已不大的情况下,农业土壤的碳汇潜力已成为各国研究的热点。我国是世界上人口最多的发展中国家,要能养活这么多人口并尽量减少温室气体源的增长和增加其收汇的容量,也已成为全球关注的热点。

改进农业管理措施在增加碳汇和减少CO<sub>2</sub>及其他温室气体排放方面有很大潜力,由于缺乏专门的、有针对性的研究,政策制定部门对其潜力和重要性还没有科学的或者说感性的认识。从20世纪80年代开始,已陆续有很多关于农业管理措施对固存土壤碳影响的报道,但这些资料都是非常零散和不全面的,而且多是从其他角度如提高作物产量、改善土壤状况等方面考虑和分析的。本书试图从农业土壤固存碳和减少温室气体及温室气体前体排放的角度,将这些资料比较系统地进一步整理和再研究,并结合我们近年的有关实验,对我国农业土壤固存碳的容量、强度及未来潜力进行综合分析,以期能为政策制定和管理部门提供一些参考和借鉴,并为我国参与联合国有关气候变化谈判及可能执行的气候变化框架公约的有关条款提供科学依据。

本书将以丰富的数据、详实的资料、最新的分析方法得出令人信服的结论。土壤碳是全球碳循环中重要的一链,加强农业土壤碳的研究,无疑会对全球变化研究和碳循环的研究做出其独特的贡献。1998年10月美国*Science*杂志曾预计土壤吸收汇的研究将成为1999年全球六大科学热点之一,之后几年,农业碳汇的研究逐步深入。作者感谢科技部(2002CB412508,2001-BA611B-04)、国家自然科学基金

基金委(39899370-3)立项支持本研究,感谢国家计委气候变化协调小组办公室、中国气象局预测减灾司、农业部科技司和合作司对本项工作的一贯支持,感谢华夏英才基金对本书出版的支持。

参加本书撰写的主要作者有:林而达(第一章、第三章、第七章与附录)、李玉娥(第二章与附录)、郭李萍(第三章、第五章与第七章)、杨修(第四章)、高德明(第五章)、陶福祿(第三章)、刘允芬(第六章)、严昌荣(第三章、第七章)。全书统稿由林而达和郭李萍完成。

作者于中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所

2003年5月

# 目 录

前言	1
<b>第一章 背景</b>	<b>1</b>
第一节 全球气候变化及温室气体的贡献	1
第二节 全球碳平衡与温室气体的排放源与吸收汇	2
第三节 土壤碳库的热力学与动力学基础	4
一、导致土壤碳聚集的因子	5
二、导致土壤碳降解的因子	5
第四节 京都议定书引入“汇”条款使研究农业土壤固碳潜力成为迫切 需要	6
第五节 我国农业土壤固碳的现状	8
主要参考文献	10
<b>第二章 农业土壤温室气体源汇功能及潜力</b>	<b>12</b>
第一节 大气中温室气体浓度及其变化趋势	12
第二节 全球温室气体排放与吸收	14
一、全球温室气体排放与吸收现状	14
二、全球农业活动对 CO <sub>2</sub> 的吸收潜力	19
三、中国农业源温室气体排放与吸收	20
第三节 人类活动对农业土壤碳汇的可能影响	20
一、保护性耕作	21
二、农业集约化管理措施	22
三、土地利用方式转变	24
四、退化土地的恢复	25
五、人类活动对土壤吸收甲烷的影响	26
六、人类活动对氧化亚氮排放的影响	28
第四节 中国主要农业生态系统温室气体通量的测定和时空分布规律	29
一、森林生态系统温室气体排放与吸收	29
二、农田生态系统温室气体排放与吸收	32
三、草地生态系统温室气体排放与吸收	36
主要参考文献	40

<b>第三章 农业发展与土壤碳库的关系</b> .....	45
<b>第一节 有关土壤碳的一些基本概念</b> .....	45
一、土壤有机碳的组成及土壤碳库 .....	45
二、土壤碳转化过程与大气碳的源汇关系 .....	47
三、计算土壤及植被生物量碳汇的方法 .....	48
<b>第二节 我国土壤有机碳的区域分布</b> .....	49
一、我国土壤碳密度地理分布特征 .....	49
二、我国土壤有机碳在土壤中的垂直分布 .....	51
三、我国土壤碳固定总量 .....	52
<b>第三节 我国农业土壤有机碳的历史演变</b> .....	53
一、1960~1980年间的土壤有机碳变化 .....	53
二、1980年之后的土壤有机碳变化 .....	54
<b>第四节 土地利用变化与土壤碳库</b> .....	56
一、农田本身的碳变化(生物质与土壤) .....	57
二、森林转化为草地的碳变化 .....	62
三、森林转化为农田的碳变化 .....	62
四、草地转化为农田的碳变化 .....	63
五、退耕还林还草的固碳效应 .....	64
六、毁林后从林地变成农林地 .....	64
七、湿地开垦利用与土壤碳库变化 .....	66
<b>第五节 非土地利用因子对碳汇的影响</b> .....	68
一、气候变暖对农业土壤固碳的可能影响 .....	68
二、酸沉降对生态系统碳循环的影响 .....	69
<b>第六节 展望:对土地资源采用生态友好的管理措施,增强农业土壤固存碳的能力</b> .....	71
一、我国的土地利用现状 .....	71
二、土地利用规划展望 .....	71
<b>主要参考文献</b> .....	75
<b>第四章 土壤侵蚀治理和废弃地恢复与土壤碳汇</b> .....	81
<b>第一节 土壤侵蚀治理和废弃地恢复简史</b> .....	81
一、土壤侵蚀治理简史 .....	81
二、矿山废弃地恢复简史 .....	83
<b>第二节 土壤侵蚀与碳流失</b> .....	84
一、中国土壤侵蚀的面积、分布及侵蚀量 .....	86
二、土壤侵蚀治理的主要措施和现状 .....	88

三、农业碳库的估算方法 .....	90
四、土壤侵蚀治理的固碳效果 .....	92
五、控制土壤侵蚀的固碳潜力 .....	94
第三节 矿山废弃地复垦与我国农业碳汇 .....	95
一、矿山开发利用及废弃土地状况 .....	95
二、矿山废弃地复垦的措施和潜力 .....	96
三、矿山废弃地复垦的固碳效果 .....	96
四、矿山废弃地复垦的固碳潜力 .....	98
第四节 退化土地恢复对农业土壤碳汇的贡献潜力 .....	98
一、世界退化土地恢复的固碳潜力 .....	98
二、我国退化土地恢复的固碳现状和潜力 .....	99
主要参考文献 .....	100
第五章 加强农田管理是增加土壤碳汇的有效措施 .....	102
第一节 保护性耕作与土壤碳汇 .....	104
一、基本概念与意义 .....	104
二、保护性耕作增强土壤碳汇的机制 .....	105
三、我国不同地区的保护性耕作类型(少免耕、垄作)与面积 .....	111
四、我国不同地区保护性耕作土壤碳汇增量 .....	112
第二节 秸秆和作物残渣管理与土壤碳汇 .....	113
一、农作物秸秆与残渣不同利用方式 .....	115
二、秸秆与残渣还田增强土壤碳汇的机制 .....	116
三、我国农作物秸秆和作物残渣资源利用现状 .....	124
四、秸秆和残渣管理增强土壤碳汇的现状 .....	126
五、秸秆和残渣管理增强土壤碳汇的潜力 .....	126
第三节 提高土壤质量,增强固碳能力 .....	128
第四节 改进轮作制度,增加固碳能力 .....	129
一、肥料管理 .....	129
二、有机粪肥和副产品 .....	132
三、提倡种植绿肥 .....	133
四、轮作和冬季覆盖作物 .....	134
五、减少夏季休闲田 .....	135
六、提高作物生产力 .....	135
第五节 灌溉水管理与土壤碳汇 .....	135
一、灌溉与排水 .....	135
二、稻田管理 .....	137

三、全国土壤水分分区 .....	139
四、中国灌溉管理固碳潜力估算 .....	140
第六节 沃土计划 .....	141
一、目标和内容 .....	141
二、实施效果 .....	142
第七节 中美农田固碳潜力估算 .....	142
主要参考文献 .....	144
<b>第六章 农业及耐用农产品增加可增强碳汇 .....</b>	<b>149</b>
第一节 农业碳库 .....	149
一、资料与方法 .....	149
二、农业碳库计算结果 .....	150
第二节 一性农产品消费与碳汇 .....	152
一、一性农产品消费概念 .....	152
二、一性农产品消费及其与碳汇的关系 .....	153
第三节 二性农产品消费与碳汇 .....	154
一、二性农产品年消费碳 .....	154
二、二性农产品消费及其与碳汇的关系 .....	154
第四节 农林副产品的再利用与碳汇 .....	155
第五节 农用林和经济林直接与间接增汇作用 .....	155
一、中国农用林和经济林的基本情况 .....	155
二、中国农用林和经济林初级增汇作用 .....	156
三、中国农用林和经济林净增汇作用 .....	160
第六节 农业的增汇作用及其潜力 .....	161
一、农业的碳汇功能 .....	161
二、第一性农林产品增加产量、提高质量对碳汇增加的潜力 .....	162
三、生活水平提高对碳汇增加的潜力 .....	162
主要参考文献 .....	163
<b>第七章 我国农业土壤减轻温室效应的潜力及技术选择 .....</b>	<b>164</b>
第一节 各种可以增加土壤有机碳的技术措施对土壤增汇的贡献 .....	164
一、农田管理 .....	165
二、草地管理 .....	171
三、农林地管理 .....	172
四、湿地管理 .....	172
五、退化土地的恢复 .....	173
六、农地转化或退耕还林 .....	173

第二节 主要固碳技术的增碳潜力·····	174
第三节 我国土壤碳汇的现状和未来潜力·····	175
一、我国温室气体吸收汇的现状·····	175
二、我国温室气体吸收汇的情景展望·····	178
第四节 农业政策对实施固碳措施的影响·····	181
一、我国已采取的政策和措施及其贡献·····	181
二、今后可能进一步采取的政策和措施·····	182
三、增加土壤碳汇的技术在实施中的问题、可能遇到的障碍及政策支持·····	184
主要参考文献·····	185
附录一 定义及缩写·····	188
附录二 世界银行生物碳基金简介·····	190
一、对土地利用、土地利用变化和林业活动(LULUCF)的碳吸收汇问题的新认识导致了京都议定书谈判的进展·····	190
二、从碳汇的基础数据看国际谈判和碳交易的趋势·····	190
三、对碳汇问题已经解决和尚未达成一致的认识·····	191
四、世界银行碳基金·····	193
主要参考文献·····	197

# 第一章 背 景

## 第一节 全球气候变化及温室气体的贡献

气候变化是国际社会公认的最主要的全球性环境问题之一。为保护全球气候,自1992年6月联合国第二次环境与发展大会起,全世界150多个国家签署了气候变化框架公约,我国也是缔约方之一。为了为公约谈判提供进一步的科学评价,政府间气候变化专业委员会(IPCC)再次组织了全世界上千名科学家,从温室气体和气候预测,影响、适应对策及脆弱性评价,减缓气候变化对策等三方面,开展了广泛的研究工作,并撰写了2000年的第三次评价报告。报告指出:在气候自然变化的同时,很可能由于人类活动改变了大气的化学成分,如大气中二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )和氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )等主要温室气体分别比工业化前增加了28%、145%和15%(1996年值)(IPCC,1996)。由于这些气体吸收地表面红外辐射能力强,而且它们在大气中的留存时间长达上百年,从而改变了地球的辐射平衡。过去100年来地球表面的平均温度已经升高了 $0.4\sim 0.8^\circ\text{C}$ (IPCC,2001)。如果不改变人口增长及经济发展方式,即在不改变主要温室气体 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 及 $\text{N}_2\text{O}$ 排放趋势的条件下,由于大气中主要温室气体浓度增加,同时考虑到温室气体和气溶胶的共同作用,今后几十年乃至上百年的时间内,全球平均气温将每十年升高 $0.2\sim 0.3^\circ\text{C}$ ;海平面可能升高 $9\sim 88\text{cm}$ (IPCC,2001)。尽管这种预测还有很大的不确定性,但全球气候变化会给人类带来难以估量的损失,适应气候变化会花费人类巨额代价的观念,已为世界绝大多数国家所接受。

对于大气中 $\text{CO}_2$ 等温室气体浓度增加的历史责任,气候变化框架公约中已有定论。缔约方中的附件一国家,即发达国家,要承担限期减排或限排温室气体的责任。发展中国家缔约方也要在规定的时间内提交自己的温室气体排放清单。因此,准确地估算各种温室气体的排放通量有十分重要的现实意义。科学上,这种估算又是十分困难的,其原因一是实际观测的困难与观测数据的缺乏,二是排放因子的不确定性。值得欣慰的是我国在这方面掌握了与国际先进水平同步的技术,包括实测技术和模拟估算技术。

尽管在了解气候系统和气候变化的原因方面已经取得了不小的进展,但仍有很大的不确定性。尽管还存在不确定性,并不意味着一个国家或社会不能做出努力,来了解温室气体的排放及其对全球气候变化的作用。据目前的估算,全球每年约有63亿吨碳是以 $\text{CO}_2$ 的形式排放到大气中的,我国约占其中的 $1/10$ ,其主要排

放源为煤、油、气等化石燃料的燃烧。全球每年甲烷的人为排放量约为 3.6 亿吨,其主要排放源是包括种植水稻和饲养反刍动物在内的农业活动。氧化亚氮的主要人为排放也来自农业。尽管根据全球碳、氮收支平衡关系可以估算出全球各主要温室气体的排放总量,但各国各地的温室气体排放量估算仍是一个世界性的课题。

除了要准确了解温室气体排放的状况,森林和土壤吸收  $\text{CO}_2$  的所谓碳吸收汇功能近年来也越来越受到重视。2000 年 5 月 8 日,政府间气候变化专业委员会组织了上百名科学家,包括一些世界著名的科学家,历时一年半,编写了《土地利用、土地利用变化和林业》特别报告。报告对全球碳循环、造林、再造林和毁林、农业土壤等的固碳潜力等做了最新估算,得到了各国的基本认可。但是与 1997 年气候变化框架公约第三次缔约方大会通过的京都议定书中有关碳汇问题条款的谈判矛盾依然没有解决。这说明现有的科学认识依然没有发展到能够解决政治矛盾的水平。

碳汇问题是部分发达国家提出的用林业和农业活动抵消(部分)减排承诺的政治手段,其目的是为了回避采取高成本的减排措施。对发展中国家来说,不会从碳汇的 CDM(指京都议定书的一种资金机制)项目中获得实质性收益,却有被套上某种“自愿承诺”的风险。

我国科技界应高度重视碳循环的研究,为此,要针对京都议定书的这些碳汇问题开展更有针对性的基础研究。这既是国际的科技发展趋势,也是关系国家利益的重大而迫切的需求。

## 第二节 全球碳平衡与温室气体的排放源与吸收汇

陆地生态系统的动力学依赖于生物地球化学循环,特别是碳循环、养分循环及水循环数量间的交互作用,而所有这些循环都会受到人类的影响而发生变化。陆地生态系统中,活的生物和死的有机物以及土壤中都含有大量的碳,因此在全球碳循环中起着关键的作用。这些系统和大气间碳的自然交换主要是通过光合作用、呼吸作用、分解和燃烧进行的。同时,人类通过土地利用、土地利用变化和林业(LULUCF)活动改变碳存储和这些碳库与大气之间的通量。在过去几个世纪的中高纬度以及 20 世纪后期的热带地区,都有持续不断的碳由于砍伐森林而释放到大气中。

碳可以固存到陆地生态系统的植被和土壤中。目前土壤中的碳总量要比植被中的大,特别在中高纬度的非林生态系统更是如此,其结果可从表 1-1 看出。

表 1-1 全球植被和 1m 深土壤碳库中的碳存储总量(IPCC,2000)

生物群系	面积/10 亿 $\text{hm}^2$	全球碳存储总量/10 亿 t		
		植被	土壤	合计
热带森林	1.76	212	216	428
温带森林	1.04	59	100	159
寒带森林	1.37	88	471	559
热带干草原	2.25	66	264	330
温带草地	1.25	9	295	304
荒漠与半荒漠	4.55	8	191	199
苔原	0.95	6	121	127
湿地	0.35	15	225	240
农田	1.60	3	128	131
合计	15.12	466	2011	2477

从 1850 到 1998 年间,大约(2700±200)亿 t 碳由于化石燃料燃烧和水泥生产以  $\text{CO}_2$  的形式排放到大气中,大约(1360±550)亿 t 碳排放是由于土地利用变化引起的,并且大部分产生于森林生态系统。这导致了大气中增加了(1760±100)亿 t 碳,大气中  $\text{CO}_2$  的浓度从大约 285ppm 增加到 366ppm(增加了 28%)。其间大约总排放量的 43% 已经保存在大气中,其余大约(2300±600)亿 t 碳,估计以大致相等的比例固存到海洋和陆地生物圈中。因此,归纳起来,陆地生态系统在这一时期表现为一个相对较小的二氧化碳净排放源。

表 1-2 表示的是 1980~1989 年和 1990~1998 年间全球年平均碳收支。虽然该表表示的陆地生态系统吸收碳的速率和趋势是很不确定的,但这 20 年期间,陆地生态系统很可能已经由一个排放源变成了弱的  $\text{CO}_2$  的净吸收汇。尽管由土地利用变化产生到大气中的净排放依然存在,但这种陆地汇的总趋势似乎已经发生。在这 20 年间,土地利用变化的排放分别达到了(17±8)亿 t/a 和(16±8)亿 t/a。而净的陆地碳吸收大约可以平衡热带土地利用变化、土地利用活动、中高纬度的自然生长、人类活动的间接作用(如大气  $\text{CO}_2$  施肥和养分沉积)以及气候变化(自然和人为的)造成的碳排放量。但现在还不能确定这些不同过程哪些更重要,同时这些过程的地区间差异也很大。

表 1-2 1980~1989 年和 1990~1998 年间全球年平均碳收支(IPCC,2000) (10 亿 t)

	1980~1989	1989~1998
1. 化石燃料燃烧和水泥生产的排放	5.5±0.5	6.3±0.6
2. 大气中保有量	3.3±0.2	3.3±0.2
3. 海洋吸收	2.0±0.8	2.3±0.8
4. 陆地净吸收=(1)-(2+3)	0.2±1.0	0.7±1.0
5. 土地利用变化的排放	1.7±0.8	1.6±0.8 <sup>a</sup>
6. 剩余陆地吸收=(4)+(5)	1.9±1.3	2.3±1.3

注:a 表示 1989~1995 年平均年排放的数字。

生态系统的模拟结果表明,在森林生态系统中由于人类活动的间接影响(如 $\text{CO}_2$ 肥效和养分沉积),全球尺度陆地对大气中 $\text{CO}_2$ 的额外吸收可能保持几十年,但其固碳作用可能会逐渐减小,森林生态系统甚至还可能变成一个排放源。一个理由是某些生态系统由于养分和其他生物物理因子影响,固存额外碳的能力有限。另一个理由是某些种植物光合作用速率不再会随着 $\text{CO}_2$ 浓度持续升高而不断增加,因为随着温度升高,异养呼吸作用会加强。第三个理由是由于气候变化造成的生态系统退化。这些结论仅仅考虑了未来 $\text{CO}_2$ 和气候变化对现在碳汇的影响,还没有考虑未来毁林或增强陆地汇活动的影响,因为还没有可做比较的分析。由于目前对生理过程的适应能力、气候变化的影响及各个过程之间的反馈机制的了解还有很大的不确定性,对未来几十年的预测将是十分不确定的。

新种植或自然再生的树木,在没有重大扰动情况下,成林后会连续固碳20~50年甚至更长时间,这取决于树种和当地的情况,当然未来几十年的定量预测仍很困难。

土地利用、土地利用变化和林业活动(如湿地的恢复、生物质燃烧和森林施肥)也会影响 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放。因此,评价这些活动对温室气体排放和吸收的影响,包括对 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放和清除的影响也需要重视。当前还没有可靠的对于林业活动造成的所有温室气体全球排放和清除量的估算值。

### 第三节 土壤碳库的热力学与动力学基础

虽然大部分碳是通过植物叶子进入生态系统的,而且在地上生物之中碳的累积也是很明显的,但超过一半的同化碳会最终转化到地下,这主要通过根的生长和转换、根的有机分泌物以及进入土壤的枯枝落叶等途径。在非林生态系统(农田、草地或湿地)中,土壤含有的碳量占整个生态系统的一半以上。

如同整个生态系统的碳储存一样,土壤碳也趋于一种“平衡”状态。这种平衡包括植物枝叶进入土壤的碳输入和土壤中的有机物分解成 $\text{CO}_2$ 或在厌氧条件下分解成 $\text{CH}_4$ 而造成的碳排放。随着碳输入和(或)分解速率的变化,土壤碳或是增加,或是减少,直至达到新的平衡。对这种变化反应最快的是土壤中很不稳定的有机成分,如根、枯枝落叶和其他易变有机成分,随着稳定成分的形成和分解,相反过程的发生就慢了。

决定土壤碳输入量的因素包括植物的初级生产和分配、植被的生命循环和外源有机物的加入,如堆肥或粪肥的使用等活动。所以,增加初级生产力和(或)把较大部分植物体还田的措施都具有增加土壤碳库的潜力。有机物的分解受各种各样物理、化学和生物因子的影响。而这些因子又受微生物和土壤细菌活动的控制(Swift et al., 1999)。这些因子包括非生物环境(温度、水、通风、酸碱度、矿物营养

等)、植物秸秆残茬数量、土壤的结构和矿质营养及土壤的扰动等。通过选择控制这些物理、化学、生物过程以减弱有机物分解速率等措施,也能增加土壤的碳储存。

在某些土壤中,土地利用和管理方式的不同能够明显地影响土壤无机碳量的变化,并使其成为大气中  $\text{CO}_2$  的源或汇。

在干旱、半干旱气候地区的生态系统中,富硅酸盐的矿物风化会释放钙和镁。这些钙和镁能够与  $\text{CO}_2$  和降水结合生成次生碳酸盐( $\text{CaCO}_3$  或  $\text{MgCO}_3$ )。这种无机碳的累积速率可以达到  $0.005 \sim 0.15 \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。含有过量钙镁的添加剂,如污水或污泥,如果通过灌溉加到了干旱地区的农田土壤中,可能增加这种无机碳的累积速率(Wilding, 1999)。比较而言,土壤中形成的次生碳酸盐具有石灰性母质,如石灰石,因而既不是  $\text{CO}_2$  的汇也不是  $\text{CO}_2$  的源。

在湿润地区,农田和草地的生物质移出或使用酸性肥料能加快天然石灰性土壤的无机碳流失。使用富含碳酸盐的地面水进行灌溉,同样可以造成碳从地表水中以  $\text{CO}_2$  的方式释放到大气中。

## 一、导致土壤碳聚集的因子

土壤碳的净累积可以通过多种方式产生,它们或是增加植物固定的碳返回到土壤中的数量,这多以根茎叶枝的形式,或是减少分解速率。各种增加生产力的措施,如品种选育、施肥、灌溉及减少裸地休闲等都可以较大幅度地增加土壤碳的输入。同样,减少作物和树林收获期枝叶秸秆的燃烧和移出也可以增加还田的生物质总量。减弱有机质分解的有利环境条件也可以降低分解速率,即减少单位时间单位土壤  $\text{CO}_2$  的排放量。这些措施包括:保持土壤表面的覆盖物或覆盖植被可以降低土壤表面温度;在厌氧条件适宜的生态系统中,如天然湿地和淹灌水稻田,不利于有机物分解和  $\text{CO}_2$  排放,却增加了  $\text{CH}_4$  的排放。减少耕作和土壤扰动已被证明可以降低土壤有机物的分解速率(Paustian et al., 2000)。

## 二、导致土壤碳降解的因子

土壤碳库的减弱是由与上述因子作用相反的一些因子驱动的。由于开垦等活动,农业土壤相对其原始状况的碳含量已经减少了  $20\% \sim 50\%$  (Schlesinger, 1986; Mann, 1986; Davidson and Ackerman, 1993)。历史上,作物生产率降低、农林产品出口、秸秆不还田或燃烧、集约耕作或裸地休闲都会立刻引起土壤碳库的减弱(Paustian et al., 1997)。类似的情况还有,由于管理不当会引起森林、草地和农田长期明显地生产力退化,土壤碳库因此也会减弱。如果湿地排干并转换成农田、草场或林地也会造成土壤的有机碳快速分解、大量损失(Armentano and Menges, 1986)。

侵蚀过程也会刺激加快土壤有机物的分解速率 (Lal et al., 1998)。土壤侵蚀造成肥力损失和结构破坏也会对净初级生产产生不利影响, 从而对碳平衡产生负面影响 (Stallard, 1998; van Noordwijk et al., 1997)。目前全球范围侵蚀对土壤碳的净作用还不清楚。要想明确地说明控制侵蚀的措施可以影响碳储存含量, 从而作为有益于气候变化的减缓措施, 还需要进一步研究。

#### 第四节 京都议定书引入“汇”条款使研究农业土壤固碳潜力成为迫切需要

1997年12月气候变化框架公约第三次缔约方会议通过的京都议定书规定了各附件一国家的温室气体限排、减排任务和时间表。京都议定书的一个重要内容就是引入了温室气体吸收汇的概念, 即允许发达国家在其减排份额中通过增强汇的吸收来减轻能源和工业部门等  $\text{CO}_2$  主要排放源的减排压力, 为其完成减排承诺提供了更多的选择机会。

IPCC 在 LULUCF 特别报告中, 提出了 10 项可以增加固碳量的主要活动, 包括三大类, 第一类是对现有土地利用类型改进管理而使其碳储量增加, 包括森林管理、放牧地管理、农田管理、农业森林管理、城市绿地管理等; 第二类为土地利用变化活动, 包括农地还林还草、农地转化为农业森林、湿地恢复和退化土地的恢复; 第三类活动为碳的异地储存, 主要为林产品中的碳储存。

从表 1-3 可以看出, 附件一国家在第一个减排承诺期 (2008~2012 年) 间, 照常排放情景下 3.3 条款的造林、再造林和森林砍伐活动 (ARD) 及 3.4 条款各活动的固碳潜力。3.3 条款活动的固碳潜力不大, 除西班牙之外, 各主要附件一国家的造林、再造林活动基本都为向大气排放  $\text{CO}_2$  而非从大气中吸收  $\text{CO}_2$ 。对汇潜力多寄希望于 3.4 条款的各项活动中。这可以从以下的基础数据中看出: 附件一国家 1990 年的温室气体排放总量 (以  $\text{CO}_2$  计) 为 137 亿 t/a, 若不采取任何控制措施, 在第一个承诺期的排放量 (BAU, 即不采取任何额外措施的照常排放) 将为 165 亿 t/a, 而按照京都议定书的规定, 其允许排放量应为 130 亿 t/a, 即需要比 BAU 减排 35 亿 t/a。与吸收汇相比较, 可以得知, 附件一国家内部的 A3.4 活动可以抵消减排量的 40%。

虽然气候变化框架公约及其京都议定书目前还只对发达国家的温室气体排放作出限制, 但各种迹象表明, 发达国家提出碳汇问题, 不仅仅是想通过自身碳汇潜力解决减排承诺问题, 而是更想通过将碳汇活动纳入京都议定书的清洁发展机制 (CDM) 项目, 通过提供少量资金、技术等援助, 使拉、亚、非等附件一国家 (发展中国家) “自愿减排”, 达到其降低减排成本和通过拉拢和施加压力使发展中国家承担减排义务的双重目的。

表 1-3 主要附件一国家 ARD 和其他 LULUCF 活动碳强度及抵消源排放的比例

国 家	ARD 活动 (以 C 计) /(Mt/a)	其他 LULUCF 活动 (以 C 计) /(Mt/a)		LULUCF 占 CO <sub>2</sub> 排放的比例/%		LULUCF 分级
	2008~2012 年	1990 年	1995 年	1990 年	1995 年	
澳大利亚	6.2	86.5		25	17	LULUCF 为源
英国		18.776	9.945	3	2	
波兰		-1.408	-43.861	0	-12	LULUCF 占源
荷兰	0.0198	-1.5	-1.7	-1	-1	排放的 -10%
捷克		-2.281		-1	-4	以下
罗马尼亚		-2.925		-1		
比利时		-2.057		-2	-2	
德国		-30	-30	-3	-3	
匈牙利		-3.097	-4.82	-4	-8	
丹麦		-2.6		-5		
保加利亚		-4.657		-5	-12	
斯洛伐克		-4.257	-5.116	-7	-11	
日本	0.2919	-83.341	-94.619	-7	-8	
法国		-33.218	-46.801	-9	-12	
意大利		-36.73		-9		
美国	12.82	-458	-428	-9	-8	
瑞士		-4.36	-5.1	-10	-12	
西班牙	-0.04	-23.166		-10		
爱尔兰		-5.16	-6.23	-17	-18	LULUCF 占
俄罗斯	60.794	-392.69	-568.85	-17	-35	源排放的
奥地利		-13.3		-21	-22	-10%~-40%
爱沙尼亚		-8.555		-23		
挪威	0.03	-10.2~-19	-7~-13.6	-29~-35	-12~-36	
芬兰	0.36	-30	-14	-56	-22	LULUCF 占
拉托维亚		-14.3	-15.831	-62	-141	源排放的
瑞典	0.112(0.017)	-34.368	-30	-62	-54	-50%~-80%
新西兰		-20.569	-13.487	-81	-49	
奥地利	0.84					
加拿大	2.2					
EU15	3.5(2.2)					
总 计		-1111.96		-8		

来源: LULUCF 活动固碳强度来源于 UNFCCC(1997a); ARD 活动固碳强度来源于 IPCC 关于 LULUCF 特别报告有关版本及章节。

注: 1. 负值表示为吸收汇, 正值表示为排放源。

2. 括号中的数值表示不同研究者的其他估计。

3. EU15 表示欧共体 15 个国家的总和。