

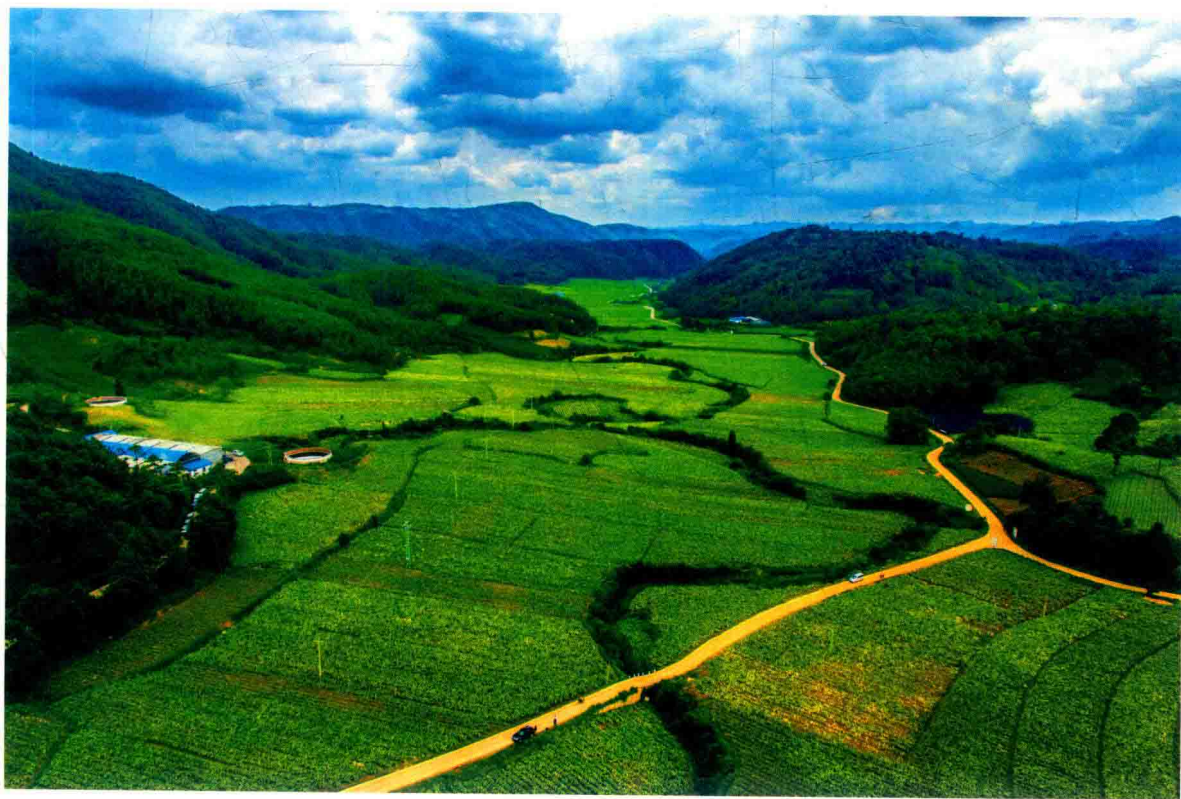
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国陆地生态系统碳收支研究丛书



中国陆地生态系统增汇 技术途径及其潜力分析

于贵瑞 赵新全 刘国华 主编



科学出版社



龍門書局



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国陆地生态系统碳收支研究丛书

中国陆地生态系统增汇技术 途径及其潜力分析

于贵瑞 赵新全 刘国华 主编

科学出版社

龙门书局

北京

目 录

前言

第一章 陆地生态系统碳汇功能与增汇技术原理及潜力概论	1
第一节 陆地生态系统固碳增汇潜力分析的概念框架	2
一、不同时空尺度的生态系统生产力的基本概念体系及其逻辑框架	2
二、生态系统碳交换通量与碳固定和碳排放速率的关系	3
三、生态系统的固碳量、固碳速率和碳储量的关系	4
四、生态系统生产力与固碳速率及碳储量的基本关系	5
第二节 生态系统固碳及增汇潜力分析的生态学基础	5
一、植物生命周期及生态系统演替对碳蓄积和固碳速率动态的影响	6
二、基于生态系统演替原理对自然因素和人为措施增汇潜力的定义	7
第三节 区域尺度陆地生态系统的增汇途径及其技术原理	8
一、全球碳收支的人为调控及其生态学原理	8
二、典型生态系统碳收支的人为管理途径及其生态学原理	9
三、人为增加区域陆地生态系统碳汇功能的技术途径及其原理	10
第四节 结语	12
参考文献	13
第二章 中国区域陆地生态系统格局动态及其自然和人为影响	14
第一节 中国陆地生态系统分布格局	15
第二节 中国陆地生态系统类型格局变化	17
一、生态系统类型的结构变化	17
二、生态系统植被覆盖度和生产力的变化	22
第三节 气候变化对中国陆地生态系统的影响	26
一、中国的气候变化状况	26
二、气候变化对陆地生态系统的影响及其区域分异	28
第四节 人类活动对中国陆地生态系统的影响	29
一、农业活动对陆地生态系统的影响	29
二、城市化对陆地生态系统的影响	30
三、资源开采对陆地生态系统的影响	31
四、生态建设工程对陆地生态系统的影响	31
参考文献	33
第三章 中国农林业发展及其对生态环境的影响	37
第一节 中国农业的总体发展状况	37
第二节 农业耕作措施的演变、政策 及其对生态环境的影响	39

- 一、化肥的推广演变历史、政策及其对生态环境的影响.....39
- 二、地膜的推广演变历史、政策及其对生态环境的影响.....42
- 三、主要作物品种的推广演变历史、政策及其对生态环境的影响.....44
- 第三节 农业耕作模式的演变、政策及其对生态环境的影响.....46
 - 一、秸秆还田的推广演变历史、政策及其对生态环境的影响.....46
 - 二、保护性耕作的推广演变历史、政策及其对生态环境的影响.....48
- 第四节 农业养殖的变化及其对生态环境的影响.....50
 - 一、畜禽养殖的变化.....50
 - 二、对生态环境的主要影响.....50
 - 三、与畜禽养殖相关的政策.....51
 - 四、畜牧养殖规模化对环境污染的影响.....51
 - 五、农业技术进步对生态环境的影响.....52
- 第五节 林业发展及其对生态环境的影响.....52
 - 一、我国林业的总体发展情况.....52
 - 二、重要政策对林业发展的影响.....53
 - 三、碳汇林业在应对气候变化中的作用.....54
- 参考文献.....54
- 第四章 中国森林生态系统碳增汇技术途径及其潜力.....56
 - 第一节 中国森林的区域分布与主要特征.....57
 - 一、中国森林的地理分布.....57
 - 二、中国森林资源的区域分布.....57
 - 第二节 中国森林植被和土壤碳储量格局.....58
 - 一、植被碳储量.....58
 - 二、土壤碳储量.....61
 - 第三节 人类活动对森林生态系统碳储量的影响.....64
 - 一、土地利用与覆被变化的影响.....64
 - 二、林分结构和抚育管理的影响.....64
 - 三、干扰的影响.....65
 - 第四节 气候变化对森林生态系统碳储量的影响.....66
 - 一、温度的影响.....66
 - 二、降水的影响.....66
 - 三、CO₂ 浓度升高的影响.....68
 - 四、大气氮沉降的影响.....69
 - 第五节 中国的森林生态系统碳汇增加潜力与可能途径.....70
 - 一、森林类型、分布及碳汇本底.....70
 - 二、森林碳增汇潜力.....72
 - 三、森林碳增汇管理的途径与对策.....72
 - 参考文献.....74

第五章 中国草地生态系统碳增汇技术途径及其潜力	79
第一节 中国草地类型及分布	79
一、天然草地	80
二、人工草地	81
第二节 中国草地生态系统碳储量及其影响因素	82
一、中国草地生物量碳储量及其影响因素	82
二、中国草地土壤碳储量及其影响因素	85
第三节 草地碳循环与增汇原理及潜力	90
一、草地生态系统的碳循环过程	90
二、关于草地碳增汇的几点认识	91
三、增强草地碳汇功能的技术原理	93
四、草地碳储量本底及增汇潜力	95
第四节 草地的主要增汇措施及固碳效果	96
一、轻、中度退化草地生态系统围封的固碳效果	97
二、中度退化草地生态系统补播的固碳效果	98
三、重度退化天然草地上建植人工草地的固碳效果	99
四、草地生态系统施肥的固碳效果	100
五、草地生态系统放牧管理的固碳效果	100
六、退耕还草的固碳效果	102
第五节 三江源区和北方沙地草地生态系统的 碳增汇管理模式	103
一、基于生态系统耦合理论的“三生”协调体系	103
二、三江源区优质高产规模化饲草料基地模式	104
三、三江源区“高原暖牧冷饲”的生态畜牧业发展模式	106
四、北方沙地草地“消费者替换”模式	107
第六节 中国草地生态系统增汇管理问题的思考	108
一、中国草地生态系统碳失汇的原因	109
二、草地生态系统的增汇管理途径和方法	110
三、中国保护草地、增强草地碳汇功能的主要对策	112
参考文献	113
第六章 中国农田生态系统碳增汇技术途径及其潜力	121
第一节 中国农田生态系统格局及其变化	122
一、中国农田分布	122
二、中国种植制度区划	122
三、中国耕地面积变化	124
第二节 中国农田生态系统碳汇功能	124
一、农田生态系统的碳循环过程	125
二、中国农田生态系统土壤有机碳储量的时空变化	125
三、农田生态系统固碳的主要影响因素	128

第三节 农田生态系统主要增汇技术的固碳效果及其潜力	131
一、施肥的固碳效果及其潜力	131
二、畜禽粪便等有机肥施用的固碳效果及其潜力	132
三、免耕和保护性耕作的固碳效果及其潜力	133
四、秸秆还田的固碳效果及其潜力	134
第四节 农田生态系统碳增汇措施的技术和经济可行性	134
参考文献	136
第七章 中国湿地生态系统碳增汇技术途径及其潜力	140
第一节 湿地分布及其变化	141
一、湿地的主要类型及其分布	141
二、湿地时空变化及其影响因素	141
第二节 中国湿地生态系统的碳储量及碳汇状况	145
一、中国湿地碳汇概况	145
二、河流碳汇现状	145
三、湖泊湿地碳汇现状	147
四、沼泽湿地碳汇现状	148
五、湿地碳汇的地域分异	150
第三节 湿地生态系统的增汇原理	151
一、湿地碳汇形成的过程机制	151
二、湿地碳汇的限制因素及其变化趋势	152
第四节 湿地生态系统增汇的技术途径与措施	153
一、湿地增汇的技术途径	153
二、中国湿地生态系统增汇的主要措施	155
参考文献	156
第八章 中国海岸带和近海生态系统碳增汇技术途径及其潜力	160
第一节 中国海岸带和近海生态系统的碳循环特征	161
一、中国海岸带和近海生态系统	161
二、中国近海湿地生态系统的植被固碳特征	162
第二节 近海生态系统的碳循环与碳汇功能	164
一、海洋的碳储量及碳循环	164
二、蓝色碳汇生态系统的碳汇功能	165
三、全球近海蓝色碳汇的固碳潜力	167
第三节 中国近海生态系统的蓝色碳汇及其潜力	169
一、中国近海的蓝色碳汇评估	169
二、近海渔业的蓝色碳汇潜力	170
第四节 中国近海生态系统碳增汇的途径与措施	171
一、发展海洋碳汇渔业	171
二、大力开展海水藻类养殖, 推动我国海洋固碳和碳汇渔业建设	173

三、在营养盐限制海区施加营养盐,提高初级生产力	173
四、建立我国渔业碳汇计量和监测体系,科学评价渔业碳汇及其开发潜力,开展针对性的基础研究	174
参考文献	174
第九章 中国重大生态恢复和建设工程的碳汇效应	178
第一节 中国重大生态恢复和建设工程概况	179
一、生态工程的内涵和主要内容	179
二、中国重大生态恢复和建设工程的发展过程	181
三、中国主要重大生态恢复和建设工程简介	182
第二节 中国生态恢复和建设工程碳汇效应的研究进展	190
一、中国生态恢复和建设工程生态效益评价	190
二、中国生态恢复和建设工程的碳汇效应	192
三、生态恢复和建设工程碳汇效应的计量方法	195
第三节 中国主要重大生态恢复和建设工程的碳汇效应	197
一、重大生态恢复和建设工程的实施面积	197
二、重大生态恢复和建设工程的固碳基线值	198
三、重大生态恢复和建设工程的碳汇效应	198
第四节 中国重大生态恢复和建设工程增汇管理的思考	200
一、构建我国重大生态恢复和建设工程生态系统碳收支的观测网络	201
二、建立我国重大生态恢复和建设工程碳汇计量、认证和决策分析平台	201
三、因地制宜地开展我国重大生态恢复和建设工程固碳增汇措施	201
四、优化生态系统各要素的调控和管理,提升重大生态恢复和建设工程固碳能力	202
五、加大配套政策和工程的实施力度,巩固并拓展重大生态恢复和建设工程的生态效应	202
六、切实加大科技投入力度,积极研发和推广固碳增汇技术和措施	202
参考文献	203
第十章 南方人工林生态系统碳增汇技术途径及其潜力	206
第一节 南方人工林的自然状况	206
一、南方人工林概况	206
二、南方人工林空间分布格局	207
第二节 南方人工林碳储量现状	208
第三节 南方人工林经营管理中存在的主要问题	212
一、结构简单,抗逆性差	212
二、纯林连栽,生产力下降	212
三、管理粗放、碳流失严重	213
四、掠夺式经营、难以持续	213
第四节 南方典型人工林固碳增汇的潜力分析与共性技术和效益分析	214

一、南方典型人工林固碳增汇潜力分析.....	214
二、南方典型人工林固碳增汇的共性技术和效益分析.....	215
第五节 南方典型人工林固碳增汇个性 技术及其适宜区域.....	227
一、马尾松纯林结构优化技术.....	227
二、竹阔混交技术.....	228
三、云杉林开林窗补植阔叶树技术.....	228
四、木麻黄海岸防护林质量提升技术.....	229
五、杉木林结构优化与施肥技术.....	229
六、橡胶林下种植技术.....	230
七、桉树林下中草药种植技术.....	232
参考文献.....	232
第十一章 北方人工林生态系统碳增汇技术途径及其潜力.....	236
第一节 北方人工林的自然状况.....	236
一、北方人工林概况.....	236
二、北方人工林的空间格局与年际动态.....	237
第二节 北方人工林的碳储量与生产力.....	239
一、北方人工林的生物量碳库.....	239
二、北方人工林的净初级生产力.....	241
第三节 北方人工林的固碳潜力及增汇途径.....	244
一、北方人工林的固碳潜力.....	244
二、北方人工林管理存在的问题.....	245
三、北方落叶松人工林碳增汇技术途径和模式.....	245
参考文献.....	246
第十二章 南方喀斯特生态系统碳增汇技术途径及其潜力.....	248
第一节 喀斯特在全球生态系统中的地位和重要性.....	249
第二节 喀斯特固碳增汇的背景与原理.....	249
一、石漠化地区碳流失的原因分析.....	249
二、石漠化地区的增汇技术原理.....	251
第三节 喀斯特增汇技术途径.....	252
一、增汇型植被恢复技术与固碳增汇经营技术.....	252
二、石漠化山区高效生态农业的增值增汇技术.....	253
三、植被类型增汇能力评价与低效林分改造技术.....	253
第四节 喀斯特固碳增汇集成模式与典型示范.....	253
一、高原型“集雨灌溉型高效生态农业”模式.....	256
二、峰丛洼地型“人工种草替代型草食畜牧业”模式.....	257
三、峡谷型“发挥光热资源优势的特色林果”模式.....	258
四、槽谷型“发挥水土资源优势的竹果产业”模式.....	259
第五节 喀斯特固碳增汇潜力及效应.....	260

一、高原型“集雨灌溉型高效生态农业”模式的固碳增汇潜力	260
二、峰丛洼地型“人工种草替代型草食畜牧业”模式的固碳增汇潜力	263
三、峡谷型“发挥光热资源优势的特色林果”模式的固碳增汇潜力	265
四、槽谷型“发挥水土资源优势的竹果产业”模式的固碳增汇潜力	267
第六节、喀斯特固碳增汇的可行性及石漠化治理对策	272
一、固碳增汇的技术可行性分析	272
二、固碳增汇的市场可行性分析	272
三、喀斯特石漠化治理对策	273
参考文献	274
第十三章 中国温室气体排放及区域分布和影响因素	276
第一节 温室效应与温室气体	277
一、气候变化与温室效应	277
二、温室气体及其对全球变暖的贡献	277
第二节 中国的温室气体排放现状、历史进程及发展趋势	278
一、中国的温室气体排放现状	278
二、中国温室气体排放的历史过程	280
三、中国温室气体排放的发展趋势	281
第三节 中国的能源活动和工业生产的温室气体排放及其影响因素	282
一、能源活动温室气体排放现状	283
二、能源活动温室气体排放的影响因素	284
三、中国工业生产过程中温室气体的排放及其影响因素	286
第四节 中国温室气体排放的区域差异	287
一、中国碳排放的区域差异及成因	287
二、中国区域间碳排放转移及“碳泄漏”现象	289
第五节 中国温室气体减排目标及措施	290
一、中国 2020 年控制温室气体排放目标	290
二、中国温室气体减排的措施	291
参考文献	292
第十四章 中国农业、林业和其他土地利用的温室气体排放及其管理途径和效果	294
第一节 IPCC 的农业、林业和其他土地利用温室气体源汇类别及管控机制	295
一、IPCC 的农业、林业和其他土地利用温室气体源汇类别及其计量方法	295
二、IPCC 关于农业、林业和其他土地利用温室气体的管控机制	298
三、IPCC 对农业、林业和其他土地利用管控温室气体状况及增汇潜力的评估	301
第二节 中国农业、林业和其他土地利用 (AFOLU) 温室气体排放概况及管理目标	302
一、农业活动温室气体排放及其影响因素	303

二、林业温室气体排放及其影响因素	304
三、土地利用变化温室气体排放	306
四、中国农业、林业和其他土地利用温室气体的管理目标	307
第三节 中国农牧业温室气体的减排潜力及管理措施	308
一、整治农业基础设施,提升农业现代化水平	308
二、推进农产品的循环综合利用,增强农村清洁能源供给	309
三、大力推广旱田作物的保护性耕作,实施精准施肥	309
四、推广稻田低碳耕作制度及 CH_4 和 N_2O 减排管理技术	309
五、改善畜牧饲料生产及畜牧养殖技术	310
第四节 中国林业温室气体的增汇减排潜力及管理措施	310
一、造林和再造林,培育森林资源	311
二、现有人工林的改造及林业经营技术	312
三、减少毁林,保护现有森林资源	312
第五节 土地利用变化的温室气体减排潜力及管理措施	313
一、自然和人工草地管理、湿地保护、北方荒漠化治理	314
二、南方喀斯特治理,海岸带和近海生态系统管理	315
三、新型城镇化模式优化与城镇土地管理	315
四、合理利用生物质能源	316
第六节 城镇废弃物及生活垃圾管理与地球工程的温室气体管理的措施及 减排潜力	316
一、城镇废弃物及生活垃圾的管理及资源化	316
二、地球工程与温室气体封存技术开发及应用	317
参考文献	318

第一章 陆地生态系统碳汇功能 与增汇技术原理及潜力概论

提要

陆地生态系统在全球碳收支中发挥着巨大的碳汇功能,对缓解全球变化具有重要意义。研究陆地生态系统碳汇功能的评估理论和方法、探讨生态系统碳增汇的生态途径和技术原理、构建区域尺度碳管理综合技术体系已成为近年来科学研究的热点领域之一。

区域尺度的碳管理及其成效评估是一个复杂的系统性问题,不同措施或途径在增汇与减排作用之间存在相互制约关系,如何定量评估及认证区域尺度陆地生态系统固碳措施的碳汇效应依然是一个重大的科技难题。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的国家温室气体清单编制指南是国际公认的碳源/汇计量方法,为我们开展区域尺度陆地生态系统的碳汇计量、验证与核查提供了技术性方案,但是在具体的应用实践中要达到 IPCC 要求的可计量、可验证与可核查的“三可”目标依然任重道远。

生态系统生产力概念是分析生态系统碳储量、固碳速率和增汇潜力的理论基础,植物生命周期及生态系统演替规律对碳蓄积和固碳速率动态过程的制约机制是研究生态系统固碳速率和碳蓄积过程特征的生态学基础,为我们确定自然因素和人为措施的基准水平及增汇潜力提供了理论依据。基于生态系统演替理论,我们可以将自然因素或人为措施的增汇/减排技术途径概括为“固碳容量调控、固碳速率调控及固碳容量与固碳速率综合调控”三种基本模式。进而基于区域陆地生态系统碳汇功能的形成过程及其影响因素,我们可以将区域陆地生态系统增汇/减排技术途径概括为“截碳开源与减排节流相结合、增强生态系统碳汇强度,调整结构、优化格局、增强区域碳汇综合强度,生态保护、减少碳泄漏损失”三个基本生态学途径。

现阶段被广泛应用于区域尺度生态系统增汇的技术措施主要包括:森林生态系统的造林再造林、退耕还林、天然林保护和森林抚育;草地生态系统的天然草地封育、退耕还草和天然草地刈割;农田生态系统的秸秆还田、少耕、免耕和合理施肥;湿地生态系统的湿地保育与退田还湖等。实践证明这些措施大多数都具有明显的增汇效果及较好的技术与经济可行性。然而我们要想按照 IPCC 的评估要求,定量评价各种管理措施的增汇效果及其潜力,并不断降低其不确定性,还需要系统性地开展生态系统碳循环及固碳过程机制研究,发展和完善评价区域陆地生态系统增汇/减排效果的理论和方法,开发区域碳源/汇的空间格局与生态过程管理的新技术,集成与示范应用区域碳管理的优化模式。

陆地生态系统的碳汇(carbon sink)和碳源(carbon source)功能是两个相对的概念。碳汇功能是指从大气中清除 CO_2 和 CH_4 等导致温室效应的气体、气溶胶或它们初期形态的任何过程、活动和机制;而碳源功能是指向大气释放 CO_2 和 CH_4 等导致温室效应的气体、气溶胶或它们初期形态的任何过程、活动和机制(IPCC, 1996)。现有的科学知识认为,陆地生态系统在全球碳收支中发挥着巨大的碳汇功能,对缓解全球变化具有重要意义。因此,研究陆地生态系统的碳汇功能和增汇潜力不仅是减缓全球气候变化的温室气体管理的迫切需求,更是地球系统碳循环与全球变化科学研究的核心内容(于贵瑞等, 2011a, 2011b, 2013)。

过去的二三十年,国内外在生态系统碳管理的实践中发展了许多具有生态和经济可行性的增汇技术,同时也从实际工作的需要和不同学科的理解方面提出了许多关于陆地生态系统固碳和增汇的科学概念、计量理论和认证方法(于贵瑞等, 2011a, 2011b, 2013)。

近年来,为了弄清中国陆地生态系统碳源/汇格局及其控制机制,国家在区域陆地生态系统碳收支及碳循环过程机制研究领域相继启动了一系列重大研究项目(于贵瑞等, 2011a),并对中国不同类型生态系统(森林、草地和农田等)的碳储存、固碳速率,以及增汇潜力的空间格局、动态变化及生态学过程开展了广泛的研究(于贵瑞等, 2013),为科学评估中国陆地生态系统碳汇功能、增汇潜力提供了科学基础。

本章作为本书的绪论,系统论述陆地生态系统碳汇功能与增汇技术原理及潜力的相关概念及其生态学原理。这里以生态系统固碳增汇的基本概念为切入点,重点论述陆地生态系统碳储量、固碳速率、固碳量,以及增汇潜力等概念及其逻辑关系,并从植物生命周期和生态系统演替的角度阐述生态系统固碳增汇的技术途径及其生态学原理,进而评述人为增汇措施的技术和经济可行性。

第一节 陆地生态系统固碳增汇潜力分析的概念框架

陆地生态系统的碳汇功能是指研究区域内森林、草地、湿地和农田等生态系统碳储量增加而固定大气 CO_2 的生态系统服务。在单位时间内单位土地面积净固定并长期储存在生态系统的 CO_2 量称为固碳强度或固碳速率。一定时期内研究区域实际固定的 CO_2 总量称为区域尺度生态系统固碳量。在特定的时间和区域范围内可能实现的最大固碳量称为区域尺度生态系统固碳潜力。但是,这些碳汇概念与经典生态学的概念体系有一定的差异,要认识这些概念的生态学基础、评估自然因素和人为碳管理活动对固碳速率及潜力的影响,还需要发展和完善评价区域尺度陆地生态系统增汇/减排效果的概念体系及其理论和方法。

一、不同时空尺度的生态系统生产力的基本概念体系及其逻辑框架

生态系统生产力概念是分析生态系统碳储量、固碳速率和增汇潜力的理论基础。其生态学含义是指单位时间内单位土地面积的植被通过光合作用形成可利用生物量的生产能力。于贵瑞等(2011a, 2013)已经提出了一个区域尺度陆地生态系统固碳速率和

增汇潜力概念框架体系，Wang 等（2015）以该框架体系为基础，依据各类生态系统碳循环的生物控制过程及时空尺度特征，考量区域碳收支总量的评估方法及其数据获取途径，重新构建了一个在自然和人为因素共同影响下大尺度生物-社会群区的生产力形成过程，以及有机碳在不同类型碳蓄积库及不同生态过程中分配消耗的逻辑关系(图 1-1)。这一概念框架为开展区域尺度陆地生态系统碳收支整合分析提供了新的思维、概念体系及方法学基础。

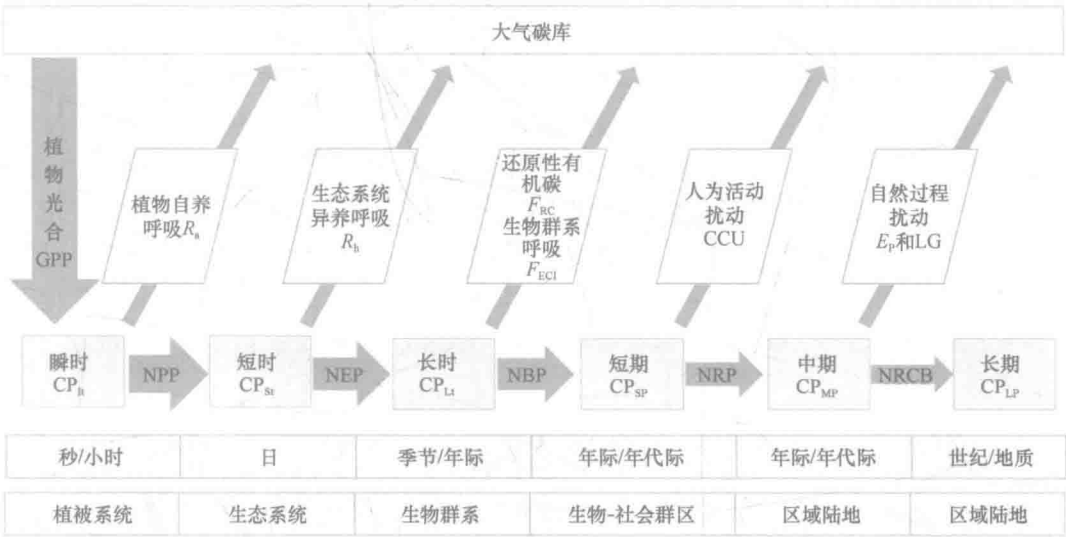


图 1-1 陆地生态系统与大气系统间的碳交换及其不同尺度生态系统生产力的概念体系
(Wang et al., 2015)

GPP. 总初级生产力; NPP. 净初级生产力; NEP. 净生态系统生产力; NBP. 净生物群系生产力; NRP. 生物-社会群区的净生态系统生产力; NRCB. 区域净碳收支。 R_a . 自养呼吸; R_h . 异养呼吸; F_{RC} . 还原性碳排放通量; F_{ECI} . 生物采食碳排放通量; CCU . 农林产品利用的碳消耗; E_p . 燃烧和火灾等物理过程碳排放; LG . 水土流失和风蚀及地质过程碳泄漏; CP_{It} . 瞬时的光合作用固定的有机碳总量 (瞬时的植被碳库, 秒和小时的动态变化); CP_{St} . 短时的生态系统现存生物量碳 (暂时的生态系统碳库/储存, 日变化和日间动态变化); CP_{Lt} . 长时的生物群系现存生物量碳 (短时碳库/储存, 季节和年际变化, 生物群系); CP_{Sp} . 短期的生物-社会群区现存生物量碳 (短期碳库/储存, 年际和年代际变化, 典型生态系统、生物-社会群区); CP_{Mp} . 中期的区域陆地生态系统现存生物量碳 (中期碳库/储存, 年际和年代际动态变化, 区域尺度陆地生态系统); CP_{Lp} . 长期的区域陆地生态系统现存生物量碳 (长期碳库/储存, 世纪和地质时期的动态变化)

二、生态系统碳交换通量与碳固定和碳排放速率的关系

生态学中的净生态系统生产力 (NEP) 或净生物群系生产力 (NBP) 与气象学的涡度相关技术直接测定的净生态系统碳交换量 (NEE) 或净生物群系碳交换量 (NBE) 相对应。因此, 利用涡度相关技术直接测定的 NEE 也称为生态系统碳的净交换速率或者俗称为生态系统净固碳速率 (CSR_N), 是指生态系统在单位时间单位面积上从大气吸收的碳通量与向大气释放的碳通量的净平衡值。现有的观测技术还难以精确区分植物群落自养呼吸 (R_a) 和生态系统异养呼吸 (R_h), 更难以直接测定生物群系的动物异养呼吸 (R_b), 所以精确地区分生态系统的 NEP 和 NBP 也极其困难。

人们通常所说的生态系统固碳速率(CSR)主要是指生态系统净固碳速率(CSR_N),即单位时间单位土地面积的植被和土壤从大气中吸收并被储存的碳或 CO_2 的物质量。根据生态系统生产力的定义,我们可以将生态系统的 GPP、NPP、NEP 和 NBP 分别转换为生态系统的总固碳速率(CSR_G)、植被净固碳速率(CSR_{VN})、生态系统净固碳速率(CSR_{EN})和生物群系净固碳速率(CSR_{BN}),相应地也可以将 R_a 、 R_h 、 R_b 转换为植物自养呼吸的碳排放速率(ER_a)、土壤微生物异养呼吸的碳排放速率(ER_h)、动物呼吸的碳排放速率(ER_b),将三个分量的总和定义为生态系统总呼吸的碳排放速率(CER_R)。

对于长时间尺度的区域生态系统与大气间的碳交换速率而言,目前还没有有效的直接观测这些通量或速率的技术(于贵瑞等, 2011a),但可以采用传统的生物量和土壤碳储量清单调查方法、典型生态系统通量观测结果的区域尺度扩展,以及生态过程-遥感模型模拟分析等方法来实现。对于区域性的多景观复合构成的生态系统而言,采用上述方法只能评估生态系统总固碳速率扣除各种碳泄漏(人为、物理排放和地质泄漏)之后的净碳积累速率,即区域净生态系统生产力(NRP)。这就是说,区域尺度陆地生态系统的总固碳速率(CSR_G)、总碳排放速率(CER_G)和总净固碳速率(CSR_{GN})可以定义为

$$CSR_G = GPP \quad (1-1)$$

$$CER_G = CER_R + ECL_G \quad (1-2)$$

$$CSR_{GN} = GPP - CER_R - ECL_G = NRP \quad (1-3)$$

式中, ECL_G 为生态系统总碳排放泄漏。

三、生态系统的固碳量、固碳速率和碳储量的关系

生态系统碳固定量(CSC)可以包括生态系统总固碳量(CSC_G)和生态系统净固碳量(CSC_N)。生态系统总固碳量是指植物通过光合作用固定 CO_2 合成有机碳的总量,它既可以是一定时间内 GPP 的积分值,也可以是 NPP 的积分值。小尺度和短时间典型生态系统的净固碳量是指植被从大气中净吸收并储存于植物和土壤之中的碳总量,是总初级固碳量扣除各种呼吸碳排放的净吸收量,为 NEP 或者 NBP 的积分值;而大尺度和长期的区域生态系统净固碳量则是 NRP 的积分值,为区域生态系统净固碳量。

目前人们通常所说的生态系统固碳速率主要是指 NEP 或 NBP,对于区域生态系统而言,其含义是指 NRP。因为只有这三个分量可以经过长期累积而被有效地储存于生态系统之中,形成植被有机碳储量和土壤有机碳储量,并且只有这三个分量可以在一定的假设条件下,利用生态学的清查方法直接测定(于贵瑞等, 2011a)。

生态系统的现存碳储量(CS_E)是生态系统现存的植被有机碳储量(CS_V)、凋落物有机碳储量(CS_L)和土壤有机碳储量(CS_S)的总和。一般将单位土地面积生态系统、植被和土壤碳储量分别定义为生态系统碳密度(CD_E)、植被碳密度(CD_V)和土壤碳密度(CD_S)。

四、生态系统生产力与固碳速率及碳储量的基本关系

基于上述概念,对于相对均一的典型森林、草地、农田和湿地等生态系统而言,其生态系统的生产力、固碳速率与固碳量和碳储量的关系可以概括为

$$CS_E(t) = CS_{E0} + \int GPP(t)dt - \int CER_G(t)dt \quad (1-4)$$

式中, $CS_E(t) = CS_V + CS_L + CS_S$, 为生态系统的现存碳储量, CS_V 、 CS_L 和 CS_S 分别为生态系统植被、凋落物和土壤的现存碳储量; CS_{E0} 为生态系统的初始碳储量 ($CS_{E0} = CS_{V0} + CS_{L0} + CS_{S0}$); 公式右边第二项为生态系统总的固碳量; 第三项为生态系统呼吸的碳排放量 ($CER_G = R_a + R_h + R_b$); 第二项与第三项的差值为生态系统净碳蓄积量, 为 NEP 或 NEE 的积分值。将其扩展为区域尺度生态系统的长期过程后, 公式为

$$CS_G(t) = CS_{G0} + \int GPP(t)dt - \int CER_G(t)dt - ECL_G \quad (1-5)$$

式中, CS_G 为长期过程决定的区域生态系统的现存碳储量; ECL_G 为生态系统总碳排放泄漏 ($ECL_G = E_p + LG + CCU$); 公式右侧第二项与第三、第四项的差值为区域生态系统净碳蓄积量, 为 NRP 的积分值。

对于异质景观及由多种类型复合而成的区域生态系统而言, 其区域性的平均固碳速率 (CSR_{AR})、平均排放速率 (CER_{AR}) 及平均碳密度 (CD_{AR}) 可以采用面积加权方法进行统计分析 (于贵瑞等, 2011a)。

$$CSR_{AR} = \frac{1}{A_{TR}} \sum_i^N CSR_i A_i \quad (1-6)$$

$$CER_{AR} = \frac{1}{A_{TR}} \sum_i^N CER_i A_i \quad (1-7)$$

$$CD_{AR} = \frac{1}{A_{TR}} \sum_i^N CD_i A_i \quad (1-8)$$

式中, A_{TR} 和 A_i 为区域土地面积和不同土地利用/覆被方式 ($i=1, 2, \dots, N$) 的面积; CSR_i 、 CER_i 和 CD_i 为不同土地利用/覆被方式下的平均固碳速率、平均排放速率和平均碳密度。

对于区域生态系统, 或者特定生态工程项目、管理制度和措施体系的固碳总量和总的现存碳储量而言, 通常采用净固碳速率与面积乘积的方法进行统计分析, 或者用碳密度的面积积分进行统计分析 (于贵瑞等, 2011a)。

$$CS_E(t) = CS_{E0} + A_{TR}(CSR_{AR} - CER_{AR}) = CS_{E0} + \sum_i^N A_i(CSR_i - CER_i) \quad (1-9)$$

$$CS_E = CS_{E0} + CD_{AR} A_{AR} = CS_{E0} + \sum_i^N CD_i A_i \quad (1-10)$$

第二节 生态系统固碳及增汇潜力分析的生态学基础

生态系统固碳速率不仅取决于环境条件, 也取决于植物自身的生长发育过程、植被

的演替阶段, 以及其功能性状的变化。在通常的土壤和气候条件下, 各种类型的生态系统固碳速率时间动态都具有相似的季节变化、年际变化和长期变化规律。但是生态系统类型、区域环境条件及人为措施会影响甚至改变这些动态变化的进程及其特征值, 这也正是人们通过改变土地利用/覆被方式、控制植物的环境条件及进行生态系统管理提高生态系统固碳能力的生态学原理, 也是定量分析和认证生态系统固碳速率和增汇潜力的生态学基础。

一、植物生命周期及生态系统演替对碳蓄积和固碳速率动态的影响

植物的生命周期和系统演替是决定生态系统固碳速率和碳蓄积过程特征的主要因素。一年生植物(草本和农作物)与多年生植物(灌丛和森林)的生命周期虽然不同, 但是它们的固碳速率和碳蓄积的动态变化具有相似性, 即植被的碳蓄积量随生长发育时间的变化可以用经典的逻辑斯谛曲线方程[公式(1-11)]来描述, 该方程的微分形式[公式(1-12)]可以看作植被的固碳速率曲线(于贵瑞等, 2011a)。

$$CS_E(T) = \int GPP(t)dt - \int CER_G(t)dt = \frac{K}{1 + \alpha e^{-\beta(t)}} \quad (1-11)$$

公式(1-11)的一阶导数为植物净固碳速率的变化曲线, 即

$$\frac{d(CS_E)}{dt} = CSR_N = NEP(t) = \frac{K\alpha\beta e^{-\beta(t)}}{(1 + \alpha e^{-\beta(t)})^2} \quad (1-12)$$

式中, K 为碳蓄积的环境容量(environment capacity, EC), 即当环境条件相对稳定时, 种群碳蓄积增长可能渐近的最大潜力值, 通常称为植被碳饱和容量(saturation capacity of vegetation carbon, SC_{vc}); α 和 β 为回归参数。

生态系统的自然演替过程是长时间尺度的生态系统生产力及碳蓄积变化的关键驱动因子。生态系统演替可分为原生演替和次生演替两种类型。生态系统具有不同的演替类型, 其生产力和碳积累的动态变化过程差别较大, 从而使碳蓄积及固碳速率动态变化模式也大不相同, 但是植被演替的整个生命周期的植被碳蓄积量和固碳速率曲线依然可以用公式(1-11)和公式(1-12)来描述(于贵瑞等, 2011a)。

在自然生态系统原生演替的早期, 由于 NPP 大于异养呼吸, 因此 NEP 为正, 植物和土壤的碳蓄积量会缓慢积累; 演替的中期, NEP 和 NPP 都会达到最大值; 到了演替的晚期, NPP 与异养呼吸大致相当, NEP 接近为零, 植物和土壤的碳蓄积量会达到稳定状态(理想情况下)。自然生态系统次生演替过程的碳蓄积和固碳速率的变化过程与原生演替基本相似, 不同的是次生演替是原有生态系统被干扰(火灾、地质灾害、采伐)后的植被恢复重建, 原有生态系统的土壤及植物残留有机物的数量和质量会对次生演替的碳蓄积和固碳速率变化过程产生影响。通常在次生演替的早期, 由于干扰后的异养呼吸碳排放会超过 NPP 的积累, 因此 NEP 可能为负值, 导致土壤碳含量下降, 在植被的 NPP 超过异养呼吸碳排放后, 生态系统的 NEP 转化为正值, 生态系统的总碳储量才会遵循逻辑斯谛曲线方程[公式(1-11)]增长(于贵瑞等, 2011a)。

造林和再造林是人工干预下森林生态系统次生演替的一种特殊形式, 通过这种方式

所建立的人工林生态系统碳积累行为与次生演替相似,其中造林和再造林过程中人为活动与自然植被破坏方式(火灾、地质灾害等)存在差异。在实际的造林和再造林过程中人们可以采用不同的森林采伐方式(皆伐、间伐、轮伐、拔大毛等)、不同的土地整治方式(火烧、翻土整地、修梯田等),以及不同的造林方式(播种、小苗植树、大苗移植),这些差异对土壤有机碳及植物残留有机物的数量和质量具有重要影响,也会影响人工林生长发育过程中的碳蓄积和固碳速率变化过程。

总体来看,植被的碳储量及 NEP 或者 NPP 的动态变化还与森林的生长发育生命周期密切关联,植被碳储量会随着树龄的增长而增大,以公式(1-11)的逻辑斯蒂曲线方程(S型生长曲线)形式积累,其生态系统的 NEP 或者 NPP 常以公式(1-12)的方式在生育中期达到高峰,生态系统呼吸 RE 会随着植物死亡和凋落物积累而持续增加,在植被生长发育的晚期,生态系统的 NPP 与 RE 会逐渐达到相对平衡状态,NEP 趋近于零,生态系统的植被碳储量趋于饱和状态,即

$$\text{植被碳储量} \approx K \quad (1-13)$$

在区域尺度上分析生态系统演替过程的固碳速率和潜力时,通常忽略其年内碳蓄积的动态变化过程,以年尺度累积的光合碳固定(AGPP)与呼吸碳排放(ARE)的净差值作为单位土地面积的年固碳速率(ACSR)或年净碳排放速率(ACER)。在不同类型的自然生态系统,以及造林和再造林所构建的丰富多样的人工生态系统之间,碳汇功能差异较大,主要体现在逻辑斯蒂曲线方程所描述的植被碳饱和容量及固碳速率变化曲线的峰值等特征参数不同。位于不同气候区的生态系统植被碳蓄积量和固碳速率曲线的形态及特征值主要是由辐射、温度、水分、养分的供给条件决定的,具有明确的生物地理学控制机制(于贵瑞等,2011a)。

二、基于生态系统演替原理对自然因素和人为措施增汇潜力的定义

分析和评价自然因素和人为措施增汇潜力需要确定基准年和基准水平、潜力水平和增汇潜力,植物的生命周期和生态系统演替原理为我们认识自然和人为增汇潜力及其基准水平提供了理论基础。生态系统的增汇潜力是相对于某个基准年和基准水平而言的,选择不同的基准年或基准水平来分析增汇潜力的结果可能是完全不同的,其结果的现实意义、生态学含义,以及经济和技术可行性也都存在较大差异。于贵瑞等(2011a)基于生态系统演替原理,对生态系统增汇潜力分析的基准水平、潜力水平和增汇潜力给出了系统性的定义。

生态系统固碳的基准水平是指在基准年和基准自然条件或基准人为调控水平下现实的生态系统固碳速率,或者用特定时间、特定区域(特定项目、特定管理、特定政策)生态系统的净固碳总量来度量和统计。生态系统碳汇计量的基准年和基准自然条件或基准人为调控水平的确定是一个十分复杂的科学与技术问题,主要根据碳计量的目的、碳管理目标和政策情景等因素。服务于《京都议定书》的碳汇计量基准年为1990年,其基准自然条件和基准人为调控水平也都是以1990年的状态为标准。

生态系统固碳的潜力水平是指在特定目标年和环境背景下,生态系统可能达到的最