

北方重要生态功能区生态安全管理理论与实践

# 草原碳增汇功能区划与 调控模式

以呼伦贝尔草原和毛乌素沙地为例

李政海 周延林 吕世海 等/著

 科学出版社

北方重要生态功能区生态安全管理理论与实践

# 草原碳增汇功能区划与 调控模式

以呼伦贝尔草原和毛乌素沙地为例

——李政海 周延林 吕世海 等/著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

在全球气候变化背景下,重要生态系统与区域碳库功能状态及其动态变化已成为学术界的研究热点。本书以扎实的野外工作为基础,全面分析了我国北方草原区和毛乌素沙地植被分布规律,建立了草原区域测产和主要生态系统类型生物量估测模型,详细阐述了草原与沙地生态系统碳库特征与区域分布规律,提出了碳增汇功能区划技术方法,编制了研究区域碳增汇功能区划图,探讨了不同尺度上增强草原生态系统碳汇功能的生态调控途径。

本书可供环境保护、资源开发、资产评估、农林科技、生态评价与规划及生态管理等领域的科研、教学和管理人员参考与应用。

### 图书在版编目(CIP)数据

草原碳增汇功能区划与调控模式:以呼伦贝尔草原和毛乌素沙地为例 / 李政海等著. —北京:科学出版社, 2019. 1

(北方重要生态功能区生态安全管理理论与实践)

ISBN 978-7-03-059250-7

I. ①草… II. ①李… III. ①草原-碳-储量-研究-内蒙古 IV. ①S812

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 242142 号

责任编辑:张 菊 / 责任校对:彭 涛  
责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 260 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 《北方重要生态功能区生态安全管理理论与实践》 丛书编委会

主 编 吕世海

副主编 吴新宏 张文军 周延林 李政海 刘军会

郑志荣 刁兆岩 李青丰 王晓江 杨婷婷

刘及东 叶生星

## 丛书参编人员(按姓氏笔画为序)

王 丽 王玉华 乌云娜 石 涛 石红霄

田美荣 冯朝阳 刘一凌 刘同海 安晓雯

孙卫国 李 鹏 李玲玲 李显玉 宋 婷

张 晨 张 雷 张宝雷 张淑敏 陈贵廷

陈艳梅 宝音陶格涛 胡 杨 胡尔查

俞海生 姜 健 贺 晶 莎仁图雅 徐 军

高军靖 郭志敏 海 龙 常学礼 鲍雅静

《草原碳增汇功能区划与调控模式  
——以呼伦贝尔草原和毛乌素沙地为例》

著者名单

主 笔 李政海 周延林 吕世海

成 员 张 靖 鲍雅静 胡志超 呼格吉勒图 宝音陶格涛

董建军

## 丛 书 序

重要生态功能区是指生态环境极度脆弱、生态系统服务功能特别重要、空间分异规律十分显著、在维护国家和区域生态安全方面起关键作用的生态区域，如水源涵养重要区、土壤保持重要区、防风固沙重要区、生物多样性保护重要区、洪水调蓄重要区等。2008年，由国家环境保护总局和中国科学院共同发布的《全国生态功能区划》，将全国共划分为3个大类、9个类型、216个生态功能区，其中划定的重要生态功能区有50个。2015年新修编的《全国生态功能区划》，进一步强化了生态系统服务功能保护的重要性，加强了与《全国主体功能区规划》的衔接，全国生态功能区总数增至242个，其中确定的重要生态功能区有63个，覆盖我国陆地国土面积的49.4%，对构建科学合理的生产空间、生活空间和生态空间，保障国家和区域生态安全具有十分重要的意义。

北方重要生态功能区是指位于我国北方地区的防风固沙重要区、水源涵养重要区、土壤保持重要区以及生物多样性保护重要区等，这些区域既是国家主体功能区规划中的限制开发区，也是我国北方重要的生态屏障区。然而，最近几十年，由于受人类不合理的经济活动和全球气候变化的共同影响，我国的重要生态功能区生态系统服务功能呈明显下降趋势，特别是植被退化、生产力下降，土地荒漠化、沙尘暴肆虐，水源涵养能力下降、水土流失加剧等现象已成为制约区域工农业生产和人民生活的主要因素。为此，《国家环境保护“十二五”规划》将重要生态功能区列为生态保护与建设领域的重点，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》也明确把“生态脆弱区域生态系统功能的恢复重建”列为环境重点领域四大优先主题之一。因此，合理保护重要生态功能区的生态环境质量，既是实现区域协调、可持续发展的基础，也是维护国家生态安全的重大战略行动。

2011年，环境保护部将“北方重要生态功能区的生态限值与安全性评价技术研究”列为该年度国家环境保护公益行业科研专项重点项目（201109025）予以支持。该项目重点以保持和维护区域生态系统服务功能为出发点，立足重要生态功能区当前迫切需要解决的环境管理难点问题，在辨析区域生态环境问题及其成因的基础上，进行了防风固沙重要区经济利用限值与安全性评价技术体系研究、水源涵养重要区生态功能稳定维持与合理植被格局研究、基于碳减排的区域生态调控模式研究、区域生态安全格局优化与评价技术研

究等，旨在缓减经济发展与生态环境保护的空间冲突，稳定维持区域生态系统服务功能，为实现区域生态保护与经济社会协调发展、促进区域生态系统良性循环提供技术保障。

本丛书为国家环境保护公益行业科研专项重点项目（201109025）重要研究成果，共三册，由吕世海研究员负责策划、组稿与统稿，项目组全体成员共同编辑完成。其中，《草原生态功能维护理论与应用》，由吕世海、吴新宏等著；《北方水源涵养功能维护与植被调控》，由张文军、吕世海等著；《草原碳增汇功能区划与调控模式——以呼伦贝尔草原和毛乌素沙地为例》，由李政海、周延林、吕世海等著。项目在实施过程中，先后得到环境保护部呼伦贝尔森林草原交错区科学观测试验研究站、内蒙古辉河国家级自然保护区管理局、呼伦贝尔市林业局等单位的大力支持。在此，对所有付出辛勤劳动的同仁，表示诚挚的感谢！

本丛书经多次审阅、修改后定稿。由于编著者学识水平有限，书中难免存在诸多不足或谬误，切望得到各位专家、学者和有识之士的批评指正。

作者

2018年9月

# 前 言

在全球气候变化背景下，重要生态系统以及区域碳库功能状态及其动态变化已成为学术界的研究热点。在《联合国气候变化框架公约》以及《京都议定书》的约束下，积极挖掘区域生态系统碳汇潜力以应对气候变化也是各国政府制定国家环境保护战略和经济发展战略所必须面对的重要命题，其最终目标就是要将温室气体的浓度稳定在使气候系统免遭破坏的水平。2010年，温家宝总理在出席哥本哈根气候变化领导人会议时承诺，中国下一步自主减排的目标是到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放量比2005年下降40%~45%。积极实施节能减排的环境保护战略与产业结构调整对策可以收到良好的温室气体“缩源”效果。同时，通过深入研究我国北方重要生态功能区碳汇功能动态变化规律，寻求有效的生态增汇途径，对我国履行《联合国气候变化框架公约》和在国际碳贸易中居于主动地位具有极其重要的意义。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》明确指出，改善生态与环境是事关经济社会可持续发展和人民生活质量提高的重大问题，并将实施区域环境综合治理、大幅度提高改善环境质量的科技支撑能力列为环境领域的主要发展思路之一。特别是在面向21世纪我国实施西部大开发的战略中，生态建设被提到了极为重要的位置。《全国生态环境保护纲要》《国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定》《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》等重要文件均明确强调了保护生态环境，加快建设资源节约型、环境友好型社会，促进经济发展与人口、资源、环境相协调的原则思路。而在《国家环境保护“十一五”科技发展规划》中，特别将“区域生态环境保护与生态系统监测技术”列为重点发展领域的优先主题，支持开展生态系统监测指标与方法研究，生态交错区、脆弱区分布、变化与监测评估方法与保护对策研究。

当前，以使用化石燃料为基础的经济社会发展模式排放了大量的温室气体导致全球气候变化，引发了气候变暖、极端天气、气象灾难、海平面上升，危及整个人类的生存和发展。无疑，工业革命建立起来的以大量使用化石燃料为基础的经济社会发展模式，将越来越难以持续。为遏制全球气候变化，人类必须大幅减少化石燃料的使用，减少温室气体排放。未来的经济社会发展模式必须建立在低碳基础之上，通过低碳发展、研发和推广低碳

能源技术、增加碳汇、发展碳吸收技术，以及节能减排、产业升级、消费模式更新和制度创新，大幅提高单位碳排放的生产效率，推动应对气候变化取得新的重大进展。

在上述背景情况下，本书以我国北方重要生态功能区为对象，研究草原与沙地区域碳排放特征，确定生态系统碳汇、碳源以及碳增汇潜力的时空分布规律，制订生态碳增汇功能区划，确立基于植被恢复的碳减排调控途径。相关研究成果可以为国家环保部门制定生态环境保护战略、确定区域碳减排途径与生态调控模式提供科学依据，并为今后可能开展的国家或重点区域生态碳增汇功能区划工作进行方法探索，通过确定生态碳增汇功能区，为北方重要生态功能区生态安全格局的整体构建提供基础支持。由于作者水平所限，错误之处在所难免，敬请谅解。

作者

2018年8月

# 目 录

丛书序	
前言	
1 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 草地生态系统固碳估算方法	2
1.3 草地生态系统固碳的影响因素	3
1.3.1 气候变化的影响	3
1.3.2 土地利用的影响	4
1.3.3 草地管理措施的影响	5
1.4 主要内容与章节安排	6
2 研究区概况与研究方法	7
2.1 研究区概况	7
2.1.1 呼伦贝尔草原概况	7
2.1.2 毛乌素沙地概况	8
2.2 技术路线与研究方法	8
2.2.1 技术路线	8
2.2.2 野外调查	8
2.2.3 资料收集	10
3 研究区植被分布规律与主要特征	11
3.1 植被分布特征	11
3.1.1 呼伦贝尔草原植被分布特征	11
3.1.2 毛乌素沙地植被分布特征	14
3.2 植被生物量估算	16
3.2.1 呼伦贝尔草原植被生物量估算	16
3.2.2 毛乌素沙地植被生物量估算	32
3.3 土壤理化性状	39
3.3.1 退化草原群落特征及其变化	40

3.3.2	不同退化阶段土壤的理化性状 .....	41
3.3.3	放牧强度对不同深度土层有机质的影响 .....	42
<b>4</b>	<b>研究区碳库特征 .....</b>	<b>44</b>
4.1	草原植物碳含量分析 .....	44
4.1.1	碳含量频数分析 .....	44
4.1.2	不同生活型功能群之间的碳含量 .....	47
4.1.3	不同水分生态型功能群之间的碳含量 .....	48
4.1.4	主要科之间的碳含量 .....	48
4.2	呼伦贝尔草原碳库特征 .....	49
4.2.1	不同植物群落类型碳库特征 .....	49
4.2.2	不同草原的植被碳库与土壤碳库的关系 .....	50
4.3	毛乌素沙地碳库特征 .....	51
4.3.1	不同植被类型碳密度 .....	51
4.3.2	碳库储量变化 .....	52
4.3.3	三种沙地类型植被的碳密度 .....	54
4.3.4	灌木、半灌木在三种沙地类型中的碳密度变化 .....	55
4.3.5	草本在三种沙地类型中的碳密度变化 .....	56
4.3.6	土壤在三种沙地类型中的碳密度变化 .....	56
<b>5</b>	<b>碳增汇潜力分析 .....</b>	<b>58</b>
5.1	呼伦贝尔草原碳增汇潜力遥感分级评价 .....	58
5.1.1	历年最大植被覆盖度未退化最佳状态图层的构建 .....	58
5.1.2	非生长季植被覆盖度参照图层的构建 .....	58
5.1.3	不同时期草原植被覆盖度变化与碳增汇潜力空间 .....	59
5.1.4	呼伦贝尔草原植被覆盖度的时空变化规律 .....	60
5.1.5	呼伦贝尔草原碳增汇潜力 .....	64
5.2	呼伦贝尔林草交错区樟子松林群落特征及其碳增汇功能 .....	66
5.2.1	樟子松林乔木层群落结构 .....	67
5.2.2	林草交错区沙地草原群落与樟子松林林下草本层群落特征 .....	68
5.2.3	林草交错区沙地樟子松林碳增汇功能 .....	69
5.3	毛乌素沙地多水平/尺度的驱动力变化 .....	70
5.3.1	土地利用/覆盖时空格局变化 .....	70
5.3.2	沙漠化变化的多水平/尺度的驱动因素 .....	74
5.3.3	政策因素对局地土地利用决策的影响及响应 .....	81

5.4	毛乌素沙地碳增汇潜力 .....	87
5.4.1	土地利用/覆盖变化情景设定 .....	87
5.4.2	碳增汇潜力分析 .....	87
6	呼伦贝尔草原碳增汇功能区划 .....	91
6.1	碳密度参照图层构建 .....	91
6.2	碳增汇潜力图层构建 .....	91
6.3	碳增汇功能区划 .....	93
6.3.1	碳增汇功能区划一级区的划分 .....	93
6.3.2	碳增汇功能区划二级区的划分 .....	95
7	基于碳增汇的生态调控模式 .....	100
7.1	区域尺度碳增汇调控模式 .....	100
7.1.1	植被覆盖状况动态及其影响因素 .....	100
7.1.2	植被有机碳库变化 .....	103
7.1.3	不同碳增汇功能区对气候变化的响应 .....	104
7.1.4	不同草原利用方式对植被与碳库水平的影响 .....	109
7.1.5	现实利用状态及其草畜平衡关系 .....	115
7.1.6	区域尺度上的碳增汇分区调控模式 .....	121
7.2	局域尺度碳增汇调控模式 .....	127
7.2.1	退化草地主要改良措施 .....	127
7.2.2	不同改良措施对退化草原群落生产力的影响 .....	127
7.2.3	不同改良措施对退化草原主要建群种的影响 .....	129
7.2.4	林草交错区沙地樟子松林建设的碳增汇模式 .....	130
7.3	家庭牧场碳增汇调控模式 .....	131
7.3.1	家庭牧场试验示范户的设计 .....	131
7.3.2	家庭牧场试验示范效果 .....	132
7.3.3	试验示范区割草与放牧对草原生产力与碳库特征的影响 .....	135
7.4	毛乌素沙地碳增汇途径与措施 .....	142
	参考文献 .....	145
	附录 成果目录 .....	153

# | 1 | 绪 论

## 1.1 研究背景与意义

在全球气候变化背景下，极端天气现象频发等一系列生态环境问题突现，越来越受到社会各界的广泛关注。导致全球气候变化的影响因素有很多，现阶段，许多专家、学者基本都赞同人类因直接排放或者土地利用等原因所排放的温室气体导致了全球气候变化这一观点。若不采取有效的措施，这种趋势持续下去将危及整个人类的生存与发展。减少人类活动所造成的温室气体排放、增加陆地和海洋生态系统碳汇，是减缓当前全球气候变化的核心思路（于贵瑞等，2011a）。在《联合国气候变化框架公约》及《京都议定书》的约束下，各国政府制定国家环境保护战略和经济发展战略所必须面对的重要命题，最终目标是要将温室气体的浓度稳定在使气候系统免遭破坏的水平。特别是温家宝总理在出席哥本哈根气候变化会议领导人会议时承诺，中国下一步自主减排目标是到2020年使单位国内生产总值（gross domestic product, GDP）二氧化碳排放比2005年下降40%~45%。我国已被认为是全球最大碳排放国之一，当前经济模式导致我国减缓排放压力很大。在这种形势下，除在社会经济领域积极实施节能减排与产业结构调整等“缩源”方式以外，在生态环境保护领域，可拓展森林、草原和湿地等陆地生态系统碳固定能力，实现对温室气体的减源增汇。

植物通过“光合作用”吸收大气中的 $\text{CO}_2$ 合成有机物，死亡植物的根系和凋落层的一部分凋落物经过腐殖化作用后，在土壤中形成有机碳并固定下来。森林作为碳固定的主体已经被重视，发展碳汇林业已经写入我国“十二五”规划。草原作为我国最大的陆地生态系统，约占全国土地面积的40%，长期以来，草原从业人员缺乏对草原碳汇功能的认识，很少从草原碳汇的角度进行生产管理。随着碳贸易市场的逐步形成，草原作为重要的碳汇将具有很高的价值，可能将远高于草原生产所创造的价值（张英俊等，2013）。草地生态系统是陆地生态系统中分布最广泛的类型之一，覆盖几乎20%的陆地面积，在全球碳循环中起着重要作用，其碳储量占全世界总碳储量的9%~16%。草地巨大的分布面积和地下碳储存能力使其成为中国陆地生态系统潜在的碳汇。中国草地面积占国土总面积的41.17%，占世界草地总面积的6%~8%，我国草地植被单位面积有机碳密度为0.32~0.35 $\text{kg C/m}^2$ （朴世龙，2004）。经测算，草地植被碳储量约为3.06Pg（1Pg=10<sup>15</sup>g），土壤碳储量约为41.03Pg，我国草地总碳储量约为44.09Pg（Ni，2002）。

草原生态系统在植物固定 $\text{CO}_2$ 的同时，通过草原土壤呼吸和动植物呼吸等排放 $\text{CO}_2$ 。固定 $\text{CO}_2$ 量大于排放 $\text{CO}_2$ 量，则草原生态系统被称为“碳汇”，反之则称为“碳源”（张英俊等，2013）。

受温度和降水等气候因子与草原管理措施影响, 草地碳库会发生汇和源的转换 (Lu et al., 2009)。近些年来的过度放牧等不合理的畜牧业活动, 已经造成了我国草地生态系统, 特别是土壤的有机碳储量明显减少。严酷的自然条件和频繁的人类活动, 使得原本敏感而脆弱的生态系统面临着退化的威胁 (樊恒文等, 2002), 将“植物—土壤”连续体中所固定的碳以  $\text{CO}_2$  的形式释放到大气中 (Helld and Tottrup, 2008), 由碳汇变成碳源。反之, 气候条件的改善或合理的草地利用和管理将有利于增加土壤有机质含量, 极大地提高草地的固碳能力, 由“源”变“汇” (张英俊等, 2013)。例如, Wang 等 (2011) 测算, 随着 1.8 亿  $\text{hm}^2$  草地封育和人工草地建植计划的实施, 至 2020 年我国草地每年可以多固定 0.24Pg C。

## 1.2 草地生态系统固碳估算方法

陆地生态系统有机碳固定的研究最早起源于美国, 20 世纪 90 年代美国能源部开始研究如何将大气中的  $\text{CO}_2$  封存在土壤中, 从而降低温室效应的负面影响 (戴尔阜等, 2015), 并于 2001 年提出了固碳科学 (carbon sequestration science) 和固碳科学技术 (science and technology of carbon sequestration) 的概念 (潘根兴等, 2007)。美国土壤学会将土壤固碳定义为, 碳固定是碳以稳定固体的形式被储存, 是通过大气  $\text{CO}_2$  被直接或间接固定而实现的。前者是植物通过光合作用将大气中的  $\text{CO}_2$  转化为植物能量; 后者是  $\text{CO}_2$  转化为诸如土壤碳酸盐的过程 (张志丹等, 2011)。而生态系统碳增汇潜力是相对于某个基准水平而言的增加能力, 其因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 (于贵瑞等, 2011a)。近年来, 国内的诸多学者针对草地生物量碳库开展了大量的研究, 并采用不同方法估算了草地植被碳储量, 取得了可喜的进展。依据估算原理, 可大致将目前的估算方法分为碳储量清单法、模型估算法和涡度相关法等。

碳储量清单法, 是利用不同植被/土壤类型的碳密度乘以该类型面积得到碳储量 (Pan et al., 2004), 碳密度可以来自文献记录, 也可以来自野外调查数据。该方法最早可追溯到 Olson 等于 1983 年建立的全球植被类型的生物量碳密度数据库 (Olson et al., 1983), 随后这种高度简化的植被生物量碳密度的类似方法在国际上被广泛采用 (高添, 2013)。例如, 王绍强等 (2003) 根据中国第二次土壤普查土种剖面数据采用土壤类型法估算中国陆地土壤有机碳蓄积量; 于东升等 (2005) 基于中国 1:100 万土壤数据库, 利用土壤有机碳储量和碳密度的空间化表达及计算方法研究中国土壤有机碳密度及储量; Yang 等 (2007) 计算得出内蒙古自治区典型草原 1m 深土壤有机碳密度为  $0.6\text{kg}/\text{m}^2$ ; Fang 等 (2010) 研究发现, 中国草地生态系统土壤有机碳密度为  $0.085 \sim 0.151\text{kg}/\text{m}^2$ 。该方法具有直接和技术简单等优点, 较适用于中小尺度碳源汇的研究, 特别适用于拥有多期植被类型 (土地利用/覆盖) 图形或统计数据的研究, 其结果对缺乏准确的  $\text{CO}_2$  通量测量数据的区域进行碳储量的估测有一定的参考和借鉴作用, 但同时也存在“因基础 (采样) 数据差异而造成研究结果差距较大”的问题 (于东升等, 2005)。此外, 由于地下生物量测定都极其困难, 通常采用地上和地下生物量的比值作为经验常数来推测地下生物量, 但是这种经验常数的确定本身

就已存在很大的不确定性, 将其应用于区域碳收支评估会产生较大的误差。

模型估算法包括气候模型、遥感反演模型、光能利用率模型和生态系统过程模型等 (Han et al., 2014)。例如, 张方敏等 (2010) 的 BEPS、Peng 等 (2011) 的 TriPlex 及 Foley 等 (1996) 的 IBIS 等生态系统过程机理的模式, 可以应用于农业和森林生态系统的固碳潜力分析; 方精云等 (2007) 利用草场资源清查资料、卫星遥感数据, 估算中国草地面积约为  $331 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 总碳库为  $1.15 \text{ Pg C}$ , 总碳密度为  $3.46 \text{ t C/hm}^2$ , 年均碳汇为  $0.007 \text{ Pg C}$ ; 朴世龙等 (2004) 利用中国草地资源清查资料, 并结合同期的遥感影像, 建立了基于最新修正的归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI), 估算我国草地植被总地上生物量为  $146.16 \text{ Tg C}$ , 总地下生物量为  $898.60 \text{ Tg C}$ , 总地下生物量是总地上生物量的 6.15 倍。因此, 这类方法多用于区域到国家和全球尺度, 而应用到区域 (或更小) 尺度会遇到参数的可获得性问题、遥感数据空间分辨率与时间分辨率的矛盾问题、模型可靠性和尺度转化等方面问题。

涡度相关法, 或称为涡度相关通量观测法, 其提供了一种直接测定植被与大气间  $\text{CO}_2$ 、水、热通量的方法 (Massman, 2002)。涡度相关指某种物质的垂直通量, 即这种物质的浓度与其垂直速度的协方差。涡度相关法可测得生态系统长期或短期的环境变量, 使人类能定量理解生态系统中水和  $\text{CO}_2$  的交换过程, 能更深入地了解气候变化对生态系统所造成的影响 (宋霞等, 2003), 弥补了生物量清查法、地面同化箱和卫星遥感等测定方法在时间上的不连续及积累数据耗时长等方面的不足, 可以在较短的时间内获得大量高时间分辨率的  $\text{CO}_2$  通量和环境变化数据, 为开展不同时间尺度的碳通量变化及其环境响应机理研究提供了方便, 已在全球范围内得到广泛应用, 成为研究森林和草地等植被与大气  $\text{CO}_2$  交换量最直接而有效的观测方法 (于贵瑞等, 2006)。可是, 涡度相关技术仍是一种小尺度生态系统观测方法, 其结果本身还只是代表观测塔周边的生态系统碳收支特征, 如果盲目地将站点的观测结果直接外推到更大区域尺度会导致较大的不确定性。

## 1.3 草地生态系统固碳的影响因素

草地生态系统的碳库包括植物和土壤两部分。其中, 超过 90% 的碳储存在土壤中, 地上生物量中的碳所占的比例不到 10% (Schuman et al., 2002)。对草地生态系统来说, 植物碳库相对比较稳定, 因此, 对草地生态系统固碳能力的管理主要考虑土壤的固碳能力 (Lal, 2004)。大量实验观测表明, 过度放牧等原因导致的草地退化将造成土壤有机碳的损失, 而一些人类活动, 特别是人工种草、围封草场和退耕还草等措施可以促进草地土壤有机碳的恢复和积累, 具有固定大气  $\text{CO}_2$  的能力。

### 1.3.1 气候变化的影响

植物的光合作用是陆地生态系统碳循环的一个重要环节, 无论是森林、海洋还是草地

生态系统都离不开这一环节，即与陆地生态系统的固碳植物的生长有着密切的关系，因此，影响植物生长的气候因素，也成为影响陆地生态系统的重要原因之一（李新宇和唐海萍，2006）。随着空气 CO<sub>2</sub> 浓度增加，草原生产力水平和水分利用效率均有所提高，草原固碳能力增强。研究表明，1m 土壤有机碳密度在降水为 400 ~ 500mm 和 500 ~ 800mm 的草地生态系统分别为 144g/hm<sup>2</sup>、164Mg/hm<sup>2</sup>（1Mg=10<sup>6</sup>g），降水是制约不同草地生态系统土壤有机碳储量及碳固持速率的主要因子（Su et al.，2005）。在水缺乏的荒漠草原和典型草原，生物量与降水量显著相关，降水量增多会提高草原生产力，增加草原碳固持能力（Bai et al.，2004）；干旱胁迫降低了生长季内蒙古自治区锡林河流域羊草草原生态系统生产力和碳累积量，使生态系统由碳汇变为碳源（Hao et al.，2010）。

温度对不同草原类型生产力的影响不同。在温带湿润草原，升温延长了植物生长期，提高了草地生产力和碳储量。但在干旱和半干旱草原，蒸发和干旱程度随温度升高而加剧，特别在降水量没有增加的情况下，草原生产力和碳固持随着温度升高而下降。徐小锋等（2007）研究发现，在气候变暖条件下，高纬度地区的生态系统植被碳库表现为增加趋势，低纬度地区的生态系统植被碳库变化不大。土壤碳库因不同生态系统表现出不同的变化特点，总体来说在全球尺度上表现为土壤碳库的减少。但我国青藏高原，其拥有永久冻土层，并分布着广泛的高寒草原和沼泽，气温升高有可能使其变成巨大的碳源（侯晓莉，2012）。

因此，在全球气候变化情况下，草地碳汇功能的变化及其作用机制还需要进一步研究，以草原碳汇为目标的管理措施，必须综合考虑气候变化对碳固持的影响。

### 1.3.2 土地利用的影响

陆地生态系统对大气中温室气体的变化起着重要的调节作用，它不仅是自然界碳的载体，更是人类社会经济活动的空间载体，它既可以通过光合作用吸收大气中的 CO<sub>2</sub> 减缓气候变化，也可以由于土地利用造成碳排放而加快气候变化进程（于贵瑞等，2011b）。土地利用所导致的土地覆盖变化过程中往往伴随着大量的碳交换（Watson et al.，2000）。研究表明，土地利用所造成的碳排放已经成为仅次于化石燃料的人为碳排放源（Houghton and Hackler，2003）。实现区域陆地生态系统碳增汇、研究增汇潜力及其机制，以及科学地评估其碳汇效应等，是地球系统碳循环研究的热点之一（王秋凤等，2012）。对草地而言，土地用途的改变与土地利用强度的加重是主要的土地利用变化形式。

就影响强度而言，土地用途的改变（如草地开垦）是影响草原土壤碳储量最为剧烈的人类活动之一。开垦使土壤中的有机质充分暴露在空气中，土壤温度和湿度条件得到改善，从而极大地促进了土壤呼吸作用，加速了土壤有机质的分解（Anderson and Coleman，1985），导致土壤中有机碳的大量释放（李凌浩，1998）。全世界范围内，草地转化为农田后将造成土壤有机碳密度降低 59%（Guo and Gifford，2002）；Qi 等（2007）在内蒙古自治区发现，典型草原耕作 30 年后，土壤有机碳含量从 29.5g/kg 下降至 21.9g/kg；Davidson 和 Ackerman（1993）发现草地开垦为农田后，由于土壤呼吸作用的增强，土壤将损失 30% ~

50%的碳储量。相对于草地开垦,过度放牧所造成的碳损失要“温和”得多,过度放牧促进草地土壤的呼吸作用,缓慢地促进碳从土壤中释放(吴建国,2003),这个过程将持续至少20年(Li and Chen, 1997)。过度放牧使内蒙古自治区羊草草原初级生产力降低了60%(李永宏,1992),且过度放牧使草地表层土壤(0~20cm)中碳储量降低了12.4%。青藏高原芨芨草型温性草原退化草地的碳储量比原生草地低了近 $20\text{t}/\text{hm}^2$ (张法伟等,2011)。

### 1.3.3 草地管理措施的影响

放牧作为一种人类活动干扰因子,通过影响草地生态系统的物质生产,能量分配,动物的采食、践踏及排泄物的输入,改变草地群落生物量分配。草地管理措施包括草场围封、人工种草、改良草场、飞播种草、退耕还草和禁牧等,合理和适宜的草原管理将使土壤有机碳增加(郭然等,2008)。

围栏封育是我国退化草地植被恢复的主要措施,若在重度退化草地全面实施围栏封育措施,固碳潜力每年达 $12.01\text{Tg C}$ 。围封作为最简单有效的草地管理措施,在减缓侵蚀并恢复土壤的养分含量方面发挥了重要作用。瞿王龙等(2004)研究了阿拉善荒漠草地围封恢复对土壤有机碳的影响,结果表明,0~10cm土层中有机碳含量显示为围封6a( $2.17\text{g}/\text{kg}$ )>围封2a( $1.79\text{g}/\text{kg}$ )>自由放牧( $1.72\text{g}/\text{kg}$ ),10~20cm土层中土壤有机碳含量随恢复时间略有增加;尚雯等(2012)以流动沙丘为对照,研究了不同围封年限下科尔沁退化沙质草地表层(0~15cm)土壤有机碳的变化,结果表明,14a和26a围封样地土壤有机碳含量随围封年限的增加而增加;敖伊敏等(2011)以内蒙古自治区典型草原为研究对象,发现重度退化草地采取生长季围封措施后土壤有机碳含量显著高于自由放牧地,且随围封年限的增加呈上升趋势,均在围封14a样地出现最大值。

退耕还草和退牧还草等草地恢复措施可以通过改善土壤理化性质、土壤微生物群落结构、植被群落结构及功能,提高凋落物及枯落物的输入,控制水土流失,以及减少风蚀等提高土壤有机碳含量(Shang et al., 2012),草地植被恢复可以显著增加土壤有机碳库(Jia et al., 2012); Acharya等(2012)研究发现,耕地转化为永久性草地,能显著增加土壤有机碳储量(Liu et al., 2008);中国黄土高原地区自1999年实施退耕还林还草工程后,土壤有机碳储量增速约为 $0.7\text{Tg C}/\text{a}$ 。

草地禁牧或恢复措施可以显著提高地上生物量、根系生物量、凋落物生物量、土壤有机碳含量及土壤呼吸和生态系统呼吸速率。土壤呼吸和生态系统呼吸与植被覆盖度、地上生物量、地下生物量和土壤水分含量呈正相关。土壤水分含量是土壤微生境中控制土壤呼吸和生态系统呼吸的关键因素。对比放牧的草地,禁牧10a后草地0~50cm中的土壤碳储量增加18.3%( $15.5\text{Mg C}/\text{hm}^2$ ),围封草场30a,土壤碳储量将增加21.9%( $18.5\text{Mg C}/\text{hm}^2$ )(He et al., 2012)。禁牧减少了草地地上植被的损失量,有利于土壤碳储量的积累(邹婧汝和赵新全,2015),禁牧或正在恢复的区域均表现为碳汇,可比放牧草地固定更多的 $\text{CO}_2$ (希吉勒,2012),维持并且促进草地生态系统的碳固定,这是一种积极的管理措施(王东,2015)。