

侯向阳 丁 勇 等◎著

内蒙古主要草原类型区 保护建设技术固碳 潜力研究

Carbon Sequestration Potential of Different Protection
and Construction Technology in the Main Types
of Grasslands in Inner Mongolia



 科学出版社

内蒙古主要草原类型区保护建设 技术固碳潜力研究

侯向阳 丁勇等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

草原作为我国最大的陆地生态系统,其碳库潜力、影响碳积累的因素及在应对气候变化中的作用,越来越引起关注。本书在试验的基础上系统总结了在典型草原、草甸草原、荒漠草原和沙地草原等不同类型区不同保护利用措施对草原植被-土壤系统碳蓄积的影响,以及草原生态系统植被-土壤碳蓄积能力、增碳潜力等功能与生态条件的关系,揭示了内蒙古主要草原类型区土壤-植被系统碳储量分布特征及碳平衡规律,提出了不同草原类型区的固碳潜能和增碳潜力以及固碳增汇的关键技术方案。

本书可为从事草原学、生态学、土壤学、微生物生态学等专业的科研和教学人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

内蒙古主要草原类型区保护建设技术固碳潜力研究 / 侯向阳等著.
—北京: 科学出版社, 2014
ISBN 978-7-03-042713-7

I. ①内… II. ①侯… III. ①草原生态系统-碳-储量-研究-内蒙古
IV. ①S812

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 282172 号

责任编辑: 罗 静 / 责任校对: 刘亚琦
责任印制: 赵德静 / 封面设计: 北京铭轩堂广告设计公司

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>

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

*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 14 插页: 4

字数: 310 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

著者名单

主著：侯向阳 丁 勇

著者：（以姓氏笔画为序）

丁 勇 王 珍 王 慧 杨婷婷 侯向阳 高 丽

萨茹拉 戴雅婷

资助项目

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目：

天然草原生产力的调控机制与途径(2014CB138800)

国家自然科学基金重点项目：

我国北方草原区气候变化适应性评价及其管理对策研究(70933004)

内蒙古自然科学基金重大项目：

内蒙古主要草原类型区保护建设技术固碳潜力研究(2010ZD08)

国家国际科技合作专项项目：

欧亚温带草原东缘生态样带建立及合作研究(2013DFR30760)

中央公益性科研院所基本科研业务费项目：

苏尼特右旗草原植被土壤碳储量研究

库布齐沙漠固沙灌木根际微生物的动态研究

鄂尔多斯高原沙地草原生态系统定位观测研究

序

在全球气候变暖的背景下,陆地生态系统的碳源/汇问题已经成为国际生态科学研究的热点问题之一,寻求到既保护大气环境、减少温室效应,又不阻碍社会经济发展的平衡点,已成为目前人类迫切要解决的问题。从解决的路径来看,在全球经济社会快速发展的今天,尤其是随着发展中国家经济发展水平的提高,在全球控制2度升温目标的过程中,温室气体的排放可能在一段时期内还会进一步增加,在降低温室气体排放强度的同时,继续增加温室气体吸收汇无疑是实现低碳发展的重要策略与手段。

草原是世界最广布的植被类型之一,约占全球陆地面积的1/3。我国草原面积约4亿 hm^2 ,占国土面积的41.7%,其面积约为耕地面积的4倍、森林面积的3.6倍。草原是陆地生态系统的重要组成部分,也是目前人类活动影响最为严重的区域,其碳素行为很活跃,具有相当大的碳蓄积能力,这些潜在碳汇在全球碳循环中起着很大的作用。随着碳贸易市场的逐步形成,草原生态系统巨大的固碳潜力和碳汇价值将不断得到体现,而这一价值可能高于草原生产所创造的经济价值,因此,草原将在我国 CO_2 减排与固碳增汇战略中扮演重要的角色,承担重要的任务。

内蒙古草原主要分布于生态脆弱区,对人类干扰、气候和环境变化反应十分敏感。过去几十年里,由于各种原因,草原大面积退化,生态系统碳平衡被打破,碳固持能力严重衰退。随着国家对草原保护和建设的重视,有大量的直接或者间接的资金投入,希冀实现草原的恢复。那么,如何通过保护建设措施来实现草原的高效恢复和可持续利用,并从恢复和利用的过程中不断增强其碳汇功能,将是目前我们面临的亟待解决的重大科技问题之一。正值此时,我有幸先睹中国农业科学院草原研究所侯向阳研究员撰写的《内蒙古主要草原类型区保护建设技术固碳潜力研究》一书,读后欣喜万分。侯向阳研究员带领其团队植根草原,多年来专注于草原保护利用与退化草原的治理工作,在基础研究和应用基础研究方面取得了一系列重要进展,对推动我国草原科学的发展做出了积极的贡献,而该书是其团队近5年来取得的又一重要成果,该书对典型草原区、草甸草原区、荒漠草原区和沙地草原区不同保护利用措施对草原植被-土壤系统碳蓄积的影响进行了深刻总结,理清了草原生态系统植被-土壤碳蓄积能力、增碳潜力等功能与生态条件的关系,揭示了内蒙古主要草原类型区土壤-植被系统碳储量分布特征及碳平衡规律,核定了不同草原类型区的固碳潜能和增碳潜力并提出了固碳增汇的关键技术方案。

据我所知,如此全面系统地针对我国北方草原不同类型区进行碳平衡和固碳潜力研究,在国内尚属少见,将成果梳理撰写成书以期业内各方学者提供参考和依据,弥足珍贵。该书的出版必将会推动我国草原生态系统碳平衡机理以及碳汇管理的研究和实践发展。所以欣然撰此序以代贺。

林西达

2014年7月于北京

前 言

我国草原面积广大，是祖国北疆重要的生态屏障，也是全国重要的草原畜牧业生产基地，其生态与生产功能举足轻重，无可替代。由于气候变化和人类不合理的利用，草原退化严重，植被生产力衰减，生态与生产功能不断下降。国家和地方十分重视草原的保护与建设。近年来，针对不同生态类型区特点，中央和地方政府实施了一系列的草原保护政策和建设措施，研发了许多草原科学利用的新技术，试图实现我国草原在“保护中利用、利用中恢复”。

生态系统“碳”的研究已经成为应对气候变化、实现区域可持续发展理论与实践中最受关注的焦点之一。“碳素”作为与生态系统生产功能和生态功能密切相关，且又对气候变化产生反馈效应的因子，将在当前和未来相当长一段时期内指导人类科学利用生态系统。本研究主要面向我国北方温性草原的不同生态类型区，包括典型草原区、草甸草原区、荒漠草原区和沙地草原区，针对草原生态保护和生产利用中的主要措施及技术，开展生态系统碳循环与碳平衡的研究，比较不同保护建设技术对草原植被-土壤系统碳蓄积的影响，分析代表性生态类型区的固碳潜能和增碳潜力，提出草原生态保护建设与科学利用可采取的关键技术措施方案，为我国自然生态系统保护和草原畜牧业永续发展决策提供重要的依据。

通过研究，获得如下主要结论：

(1)以典型草原为例，研究了围封、刈割和不同放牧强度下草原土壤-植被的有机碳分布与碳储量。典型草原不同利用方式和放牧强度下植物碳含量较稳定，为42%~44%，接近国际上通用的植物碳转换率45%；地上、地下植物碳密度随利用强度的增强而减少，且两者之间有极显著相关性($P < 0.01$)。不同利用方式和放牧强度下0~100cm土壤有机碳密度为8.77~17.73kg/m²，适度放牧利用有益于典型草原植被-土壤系统碳蓄积，碳密度为13.53~16.82kg/m²；在典型草原区域内，利用方式和放牧强度对土壤有机碳密度的影响大于空间差异；土壤有机碳的垂直分布呈显著的递减规律，基于不同退化程度之间的较大差异，可以用对数关系描述土壤碳密度与土壤深度之间的关系，即不退化草地 $y = 0.5685\ln(x) + 3.118$ ($R^2 = 0.849$)，轻度放牧退化 $y = 0.6943\ln(x) + 3.843$ ($R^2 = 0.833$)，中度放牧退化 $y = 0.4932\ln(x) + 3.265$ ($R^2 = 0.825$)，重度放牧退化 $y = 0.553\ln(x) + 3.217$ ($R^2 = 0.902$)。研究结合植被法与模型法估算了内蒙古锡林郭勒盟典型草原植被-土壤系统碳储量为1.51Pg，其中96%的碳储存在土壤当中。通过不同利用方式和利用强度的比较，研究认为内蒙古典型草原现实草地固碳潜能以中度退化下植被-土壤系统碳储量(17.73kg/m²)为参照，估算出锡林郭勒典型草原不退化、轻度退化和重度退化草原单位面积和区域增碳潜力分别为3.87kg/m²、1.35kg/m²、2.71kg/m²和3.24Tg、16.83Tg、115.86Tg，区域总增碳潜力为135.93Tg。

(2)草甸草原不同放牧退化程度植被-土壤系统碳密度的研究表明，植物碳含量在不

同退化程度下的变化范围 31%~45%，总体表现为中度退化下植物碳含量高于围封、轻度退化和重度退化的规律。植物碳密度由于现存生物量的贡献，呈现出随着退化程度的增加而减少的趋势。0~100cm 土壤有机碳密度变化范围为 5.26~30.57kg/m²，其垂直分布呈显著递减规律，不同退化程度草地土壤碳密度没有表现出明显的一致性规律。草甸草原土壤固碳潜力为 30.57kg/m²(10 年以上围封样地为最高参照)，增碳潜力可达 7.33~25.31kg/m²，其增碳潜能大于典型草原。

(3) 不同植被群落、不同放牧制度及强度影响了荒漠草原的碳平衡和碳储量。对比不同降水年型下(2009 年、2010 年以及 2012 年)围封禁牧、自由放牧和划区轮牧对土壤呼吸差异，可以进一步揭示放牧制度的生态效应。结果显示，围封禁牧的土壤呼吸值 3 个年份均为最高的，相比围封禁牧，自由放牧和划区轮牧土壤呼吸值分别下降了 23.0%和 14.1%；生长季，不同放牧制度下草原植被-土壤系统表现为碳汇。但是，长期围封会通过土壤呼吸排放大量的碳，进而影响土壤碳蓄积；在干旱的年份，自由放牧和划区轮牧显著降低了生态系统的土壤呼吸速率，而在降水量充足的年份，各处理间没有明显差异。年内降水资源分配影响着植被-土壤系统的有机碳储量动态。以荒漠草原小针茅群落为例，地上、地下生物量受生长季降水分配的影响明显，不同降水分配下其变化曲线呈多态特征，土壤有机碳的季节变化呈单峰型曲线。从 5 月份开始土壤有机碳逐渐增加，到 7 月底达到峰值，8 月、9 月又逐渐降低，0~10cm 土层地下生物量和土壤有机碳呈显著正相关。不同植被类型植被-土壤的碳密度差异显著，以苏尼特荒漠草原为例，区域土壤平均碳密度为 14.63kg/m²，其中短花针茅草原的土壤碳密度最高，为 18.69kg/m²，红砂、珍珠柴草原化荒漠的土壤碳密度最低，仅为 4.36kg/m²。另外，基于小针茅、无芒隐子草群落的放牧强度试验结果显示，地上生物量和地下生物量均随放牧强度增加而显著减小，随着土层深度的增加，地下生物量均呈明显降低趋势。以围封禁牧为对照，轻度放牧下荒漠草原土壤有机碳有所增加，中度放牧、重度放牧和极重度放牧下土壤有机碳较对照区均有不同程度降低，这进一步说明轻度放牧有利于土壤有机碳的积累。加强管理，恢复退化草地可有效增加草地植被-土壤有机碳储量。内蒙古苏尼特右旗小针茅草原面积为 9893km²，以中度放牧为管理标榜，其地上植被、根系和土壤的增碳潜力分别可达 0.17Tg、0.53Tg 和 2.34Tg。

(4) 基于对不同保护利用方式及不同植被恢复模式下沙地草原生态系统碳的相关研究发现，围封禁牧和自由放牧地油蒿群落植被-土壤系统碳密度分别为 2.30kg/m² 和 2.68kg/m²，围封禁牧和自由放牧地植被碳密度和土壤有机碳密度在生长季差异不显著。随着植被恢复演替的推进，植被-土壤系统碳密度增大，流动沙地、半固定沙地和固定沙地植被-土壤系统碳密度分别为 1.13kg/m²、1.70kg/m² 和 2.58kg/m²。与围封禁牧相比，自由放牧方式下无论在季节尺度上还是在日变化尺度上，土壤碳通量波动都变大。不同沙地恢复植被土壤微生物量碳差异显著，苜蓿地土壤微生物量碳最高，其余依次为固定沙地油蒿群落、中间锦鸡儿群落、半固定沙地油蒿群落。另外，研究还显示土壤微生物量碳与土壤呼吸、含水量和有机碳含量之间具有极显著相关关系。不同围封演替阶段油蒿草地碳储量为固定沙地 37.86Tg C、半固定沙地 26.55Tg C、流动沙地 15.79Tg C、鄂尔多斯高原沙地油蒿草场碳储量为 80.20Tg C。以固定沙地为参照，鄂尔多斯高原油蒿草

场植被-土壤的增碳潜力为 $0.88\sim 1.45\text{kg/m}^2$ ，油蒿草场增碳潜力约为 76Tg 。轻度自由放牧对固定沙地油蒿草场碳密度也有一定影响，轻度放牧利用有助于土壤-植被的碳蓄积。

总体来看，不同草原类型固碳潜力的大小关系为草甸草原 (30.57kg/m^2) > 典型草原 (18.51kg/m^2) > 荒漠草原(以小针茅草原为主要代表类型) (15.84kg/m^2) > 沙地草原 (2.58kg/m^2)；单位面积增碳幅度，草甸草原为 $0\sim 25.31\text{kg/m}^2$ ，典型草原为 $0\sim 3.87\text{kg/m}^2$ ，沙地草原 $0\sim 1.45\text{kg/m}^2$ ；区域增碳潜力，典型草原为 1.26kg/m^2 ，荒漠草原约为 0.31kg/m^2 ，沙地草原为 0.20kg/m^2 ；草甸草原多年围封有利于系统的碳固持，而典型草原、荒漠草原和沙地草原应采取适度的放牧利用措施。

本书在编写的过程中，侯向阳研究员和丁勇博士统筹规划，精准把握全书脉络与布局，组织团队将研究成果梳理总结并撰写成稿。第一章主要由侯向阳、戴雅婷、高丽撰写，第二章主要由萨茹拉撰写，第三章主要由萨茹拉、侯向阳和丁勇撰写，第四章主要由杨婷婷撰写，第五章主要由高丽、戴雅婷共同撰写。此外，参与撰写的人员还有王珍、王慧等。

本书的出版，是集体劳动与智慧的结晶，我们衷心希望本书能为从事草原生态系统碳循环研究工作的学者提供一定的参考。由于学术水平有限，书中难免有疏漏之处，期待有关专家和广大读者给予指正。

作 者

2014年7月20日

目 录

序

前言

第一章 草原碳储量与固碳潜力研究进展	1
第一节 陆地生态系统碳储量研究趋势和热点	1
一、陆地生态系统碳储量研究现状	1
二、陆地生态系统碳储量研究存在的问题	4
三、陆地生态系统碳储量研究趋势和热点	6
第二节 草原碳储量及固碳潜力研究趋势	8
一、植被碳储量	8
二、土壤碳储量	9
三、草原固碳潜力研究	10
第三节 草原碳储量及固碳潜力研究方法	11
一、地上生物量的研究方法	11
二、地下生物量的研究方法	11
三、土壤碳储量研究方法	12
四、草原固碳潜力研究方法	13
第四节 内蒙古草原碳储量及固碳潜力研究进展	15
一、内蒙古不同生态类型区植被-土壤系统固碳潜力比较研究	15
二、典型草原放牧优化与草地土壤碳蓄积研究	21
三、典型草原放牧利用与土壤有机碳储量关系的研究	25
四、不同放牧制度对荒漠草原碳平衡影响的研究	28
五、沙地草原不同修复措施下生态系统恢复研究	31
第二章 典型草原不同保护利用方式和利用强度对碳储量的影响	39
第一节 引言	39
第二节 研究材料和主要研究方法	41
一、研究区域概况	41
二、研究样地设置	42
三、取样和测定方法	44
四、遥感数据处理	47
五、主要分析统计方法	47
第三节 研究结果	48
一、不同退化草地植被-土壤碳密度及其分布规律	48
二、不同利用方式和放牧强度对植被-土壤碳蓄积的影响	56
三、典型草原区域植被-土壤碳储量估算与固碳潜力	66
四、不同放牧利用方式对土壤呼吸及生态系统碳平衡的影响研究	71
第四节 结论	77

第三章 草甸草原不同放牧强度下碳储量及固碳潜力研究	79
第一节 引言.....	79
第二节 研究材料和主要研究方法.....	80
一、研究区域概况.....	80
二、研究样地设置.....	80
三、取样和测定方法.....	81
四、主要分析统计方法.....	81
第三节 研究结果.....	81
一、不同退化草地植被-土壤碳密度及其分布规律.....	81
二、草甸草原土壤固碳潜力分析.....	85
第四节 结论.....	85
第四章 荒漠草原不同保护利用方式下生态系统碳平衡及动态分析	86
第一节 引言.....	86
一、研究目的、意义.....	86
二、主要研究内容.....	87
第二节 研究材料和主要研究方法.....	88
一、研究区域概况.....	88
二、研究样地设置.....	90
三、取样和测定方法.....	91
四、主要分析统计方法.....	93
第三节 研究结果.....	94
一、不同保护利用方式下碳平衡研究.....	94
二、不同放牧强度下的草地碳储量.....	104
三、不同植被类型碳储量研究.....	107
四、不同植被类型土壤有机碳动态及影响因素.....	111
五、苏尼特右旗草原碳储量估算及固碳潜力分析.....	114
第四节 结论.....	127
第五章 沙地草原不同保护利用方式下生态系统碳循环与固碳潜力分析	129
第一节 引言.....	129
第二节 研究材料和主要研究方法.....	131
一、研究区域概况.....	131
二、研究样地设置.....	132
三、取样和测定方法.....	134
四、主要分析统计方法.....	140
第三节 研究结果.....	140
一、不同保护利用方式对植被-土壤系统碳密度的影响.....	140
二、不同围封演替阶段碳密度研究.....	147
三、不同保护利用方式土壤碳通量.....	156
四、不同围封演替阶段油蒿草场土壤碳通量.....	171
五、鄂尔多斯沙地油蒿草场碳储量与固碳潜力.....	174
六、不同保护利用方式和植被类型土壤呼吸研究.....	174
七、不同植被类型土壤有机碳储量、土壤呼吸及微生物量碳.....	178

八、不同固沙方式植物根际与非根际土壤性质研究·····	181
九、不同固沙方式土壤微生物与土壤化学性质的关系·····	190
第四节 结论·····	195
主要参考文献·····	198
彩图	

第一章 草原碳储量与固碳潜力研究进展

第一节 陆地生态系统碳储量研究趋势和热点

一、陆地生态系统碳储量研究现状

《联合国气候变化框架公约》将气候变化定义为“经过相当一段时间的观察，在自然气候变化之外由人类活动直接或间接地改变全球大气组成所导致的气候改变” (IPCC, 2007)。IPCC 第五次评估报告 (AR5) 采用大量、独立的数据进一步明确了自工业革命以来, 化石燃料的燃烧、土地利用变化等人类活动导致大气中 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 浓度显著增加, CO_2 浓度累计增加了约 40%, CH_4 增加了 150%, N_2O 增加了 20% (Ciais *et al.*, 2013; 於琰和朴世龙, 2014)。AR5 报告指出, 相对于 1961~1990 年, 1880~2012 年全球地表平均温度约上升了 0.85°C ; 1971~2010 年海洋上层 (0~700m) 已经变暖; 1979~2012 年, 北极海冰面积以每十年 3.5%~4.1% 的速度减少; 随着气候变暖, 高温热浪将变得更加频繁, 且持续时间更长, 湿润地区将有更多降水, 而干旱地区的降水将变得更少; 未来极端性天气气候事件的发生概率可能将进一步增加, 而人类则需要更多的应对措施来避免自己受到不利的影 响 (中华人民共和国中央人民政府, 2013)。为了阻止温室气体的增多, 世界各国都在积极行动。《联合国气候变化框架公约》及《京都议定书》的签订得到了世界上许多国家的支持, 促进了一系列国家政策的出台, 创建了全球碳市场和新的体制机制。

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 (陈洋勤等, 2008)。全球碳循环与气候变化的关系密切, 使得地球系统的碳库变化和碳循环过程机制问题成为气候变化成因分析、变化趋势预测、减缓和适应对策等全球变化科学研究中的基础问题, 并受到科技界和国际社会的广泛关注 (于贵瑞等, 2011)。参与碳循环过程的主要碳库包括大气、海洋、陆地生物圈、土壤和沉积物 (钟华平等, 2005)。研究表明, 人类活动排放的 CO_2 有一半以上被陆地和海洋生态系统所吸收, 但其大小和分布存在显著的不确定性, 且年际差异巨大。全球生态系统碳源汇的时空不确定性主要来自陆地, 因为相对于较为均一的海洋, 陆地生态系统更为复杂多样 (方精云等, 2010)。

陆地生态系统的碳储量是研究陆地生态系统与大气碳交换的基本参数, 也是估算陆地生态系统吸收和排放含碳气体数量的关键要素 (Valentini, 2000)。准确了解当前各种生态系统碳储库的大小、位置、碳排放和碳吸收通量, 并切实评估不同类型植被和土壤的碳存储能力, 是制定合理政策措施, 提高世界植被和土壤的碳吸收速度, 增加陆地碳存储量的基础 (吕超群和孙书存, 2004; Robin *et al.*, 2000)。陆地碳库主要以 3 种形式存在: 植物碳库、土壤有机碳库和凋落物碳库。全球陆地植被碳库在 420~830Pg C, 凋

落物在 70~150Pg C, 土壤碳库是最大的碳库, 在 1200~2000Pg C, 是植被碳库的 1.5~3 倍。因此, 土壤碳库在全球碳循环中起着更大的作用(于贵瑞等, 2003)。

从全球不同植被类型的碳储量情况来看, 陆地生态系统碳储量主要在森林地区(Falkowski *et al.*, 2000), 森林生态系统中储存的总碳量约为 854~1505Pg C, 其储存了全球 80% 以上的地上碳储量和 40% 左右的全球土壤碳储量(王棣等, 2014; IPCC, 2000)。全球森林生态系统碳储量变化有以下几个规律: 森林植被的碳密度随纬度的升高而降低, 而土壤碳密度则相反; 全球森林土壤碳储量约为植被碳储量的 2.2 倍(Dixon *et al.*, 1994)。全球草地生态系统中碳的总储量约为 308Pg C, 其中约 92%(282Pg C) 储存在土壤中, 地上生物量中的碳所占的比例不到 10%(26Pg C)(张英俊等, 2013; Schuman *et al.*, 2002), 草地的植被碳储量也基本随纬度升高而降低, 而土壤碳储量则相反(吕超群和孙书存, 2004)。全球湿地生态系统中碳的总储量约为 77Pg C(曾掌权等, 2013), 全球湿地碳储量的绝大多数储存在泥炭地中, 而 90% 的泥炭地分布在北半球温带及寒冷地区(Eino, 1996)。IPCC 的报告估计, 在未来的 50~100 年中, 农田土壤可固定碳 40~80Pg C, 由于土地利用变化, 导致碳释放量为 1.1Pg C, 它远小于农田的碳储量(王春权等, 2009)。

从不同的气候带来看, 碳蓄积主要发生在热带地区, 全球 50% 以上的植被碳和近 1/4 的土壤有机碳储存在热带森林和热带草原生态系统, 另外约 15% 的植被碳和近 18% 的土壤有机碳储存在温带森林和草地, 剩余部分的陆地碳蓄积则主要发生在北部森林、冻原、湿地、耕地及沙漠和半沙漠地区, 这与全球碳密度的空间分布格局相一致(遇蕾和任国玉, 2007; 陶波等, 2001; Watson and Verardo, 2000)。从全球来看, 陆地生态系统土壤有机碳主要储存在北半球, 特别是在气候变化背景下最为脆弱的区域——永久冻土区(寒带湿润区), 土壤有机碳储量最高, 与之相反, 植被碳储量最高值出现在热带湿润区(表 1-1)(Jörn *et al.*, 2014)。

表 1-1 陆地生态系统碳储量沿气候区分布特征(单位: Pg C)

气候区	植被碳储量	土壤有机碳储量	总碳储量
热带潮湿区	140.2	128.0	268.1
热带湿润区	151.7	150.9	302.6
热带干旱区	42.5	136.2	178.7
热带山地	40.5	56.1	96.6
暖温带湿润区	28.7	63.0	91.7
暖温带干旱区	24.2	78.5	102.7
寒温带湿润区	28.5	210.3	238.8
寒温带干旱区	9.1	102.2	111.3
寒带湿润区	23.5	356.7	380.2
寒带干旱区	5.1	69.1	74.2

续表

气候区	植被碳储量	土壤有机碳储量	总碳储量
极地湿润区	2.2	52.4	54.5
极地干旱区	0.5	12.3	12.8
合计	496.6	1415.7	1912.2

注: 来自 Jörn *et al.*, 2014。

中国陆地生态系统是一个巨大的碳库, 在全球碳循环及全球气候变化中起着相当重要的作用(王绍强和周成虎, 1999)。中国学者们对中国陆地生态系统碳储量进行了大量的研究, 并取得了若干重要成果。根据已有的研究结果, 中国陆地生态系统碳储量在 95.99~191.79Pg C, 植被碳储量在 6.1~57.9Pg C, 土壤有机碳储量在 50~185.69Pg C(表 1-2)。不同研究采用的估算方法主要有两种: 一种是采用资源清查数据和植被面积进行计算, 另一种是采用模型进行估算(Yu *et al.*, 2010)。中国不同植被类型的碳储量由大到小顺序为: 草地、森林、农田、灌丛、荒漠、湿地, 其中草地、森林、农田三大生态系统碳储量占中国陆地生态系统碳储量的近 80%(表 1-3)。在草地、灌丛、荒漠、湿地生态系统中, 90%以上的碳储存在土壤中, 只有在森林和农田生态系统中, 植被碳储量所占比例超过了 10%。

表 1-2 中国陆地生态系统碳储量估算(单位: Pg C)

文献来源	植被碳储量	土壤有机碳储量	生态系统碳储量
方精云等, 1996	6.1	185.69	191.79
Peng and Apps, 1997	57.9	100	157.9
王绍强等, 1999	—	100.18	—
潘根兴, 1999	—	50	—
Ni, 2001	35.23	119.76	154.99
李克让等, 2003	13.34	82.65	95.99
解宪丽等, 2004	—	84.14	—
黄玫等, 2006	14.04	—	—
Ji <i>et al.</i> , 2008	13.74	82.77	96.51
Yu <i>et al.</i> , 2010	13.71	84.24	97.95

注: 来自 Yu *et al.*, 2010。

表 1-3 中国不同植被类型碳储量

植被类型	植被碳储量/(Pg C) (占生态系统碳储量百分比)	土壤有机碳储量/(Pg C) (占生态系统碳储量百分比)	生态系统碳储量/(Pg C)	占全国碳储量百分比/%
森林	7.47(25.09%)	22.31(74.94%)	29.77	26.69
草地	2.52(5.54%)	43.00(94.48%)	45.51	40.79

续表

植被类型	植被碳储量/(Pg C) (占生态系统碳储量百分比)	土壤有机碳储量/(Pg C) (占生态系统碳储量百分比)	生态系统碳储量/(Pg C)	占全国碳储量百分比/%
灌丛	0.85 (8.54%)	9.10 (91.46%)	9.95	8.92
农田	2.00 (15.17%)	11.18 (84.83%)	13.18	11.81
荒漠	0.47 (5.62%)	7.89 (94.38%)	8.36	7.49
湿地	0.24 (4.99%)	4.57 (95.01%)	4.81	4.31
合计	13.56 (12.15%)	98.03 (87.86%)	111.58	

注: 来自 Yu *et al.*, 2010。

中国陆地生态系统的碳储量分布状况与全球陆地生态系统碳储量空间分布的规律在大体上是吻合的。这表现在中国东部地区, 由热带雨林向北到北方针叶林之前植被碳储量基本随纬度升高而降低, 土壤碳储量随纬度升高而增加。但由于气温、降水、季风和地形等区域条件的影响, 中国陆地生态系统的碳储量格局又有其自身的独特之处(吕超群和孙书存, 2004)。中国东北地区的寒温带、温带山地针叶林植被碳储量很高; 北部地区植被和土壤碳储量具有随经度减小而递减的趋势; 在我国中西部之间具有一条过渡带, 与腾冲-黑河人口分界线平行, 植被和土壤碳储量在界线两旁差异是比较大的; 在西部地区则呈现随纬度减小而增加的趋势(王绍强等, 1999)。

二、陆地生态系统碳储量研究存在的问题

20 世纪 70 年代, 由国际地圈-生物圈计划发起了全球碳循环研究, 紧接着 IPCC 第一次评估报告的发布和《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》的签订, 极大地促进了全球范围内碳循环的研究(Yu *et al.*, 2010)。尤其是近 20 年来, 来自世界各地的学者们对陆地生态系统碳储量进行了大量的研究, 取得了一些卓有成效的成果。这些研究结果让人们们对陆地生态系统碳储量的大小及分布有了一定的认识。但是, 陆地生态系统碳储量的估算研究仍然存在较大的不确定性。不确定性的来源主要有: 土地利用/覆盖变化(LUCC)、气候变化、管理措施、深层土壤有机碳储量和估算方法。

土地利用/覆盖变化(LUCC)是估测陆地生态系统碳储量中最大的不确定因素(陈广生和田汉勤, 2007; Levy *et al.*, 2004; King *et al.*, 1995)。土地利用/覆盖变化会对生态系统的结构和功能产生很大影响, 并改变生态系统的小气候状况以及物理化学性质, 从而影响凋落物的质量(碳氮比、单宁和纤维素含量等)和分解速率、土壤生物(动物和微生物组成)、土壤物理结构(砂砾、黏粒、粉粒组成以及土壤黏聚体结构)、土壤碳、氮、水含量、土壤有机质质量(易分解和不易分解的有机质比例)等(陈广生和田汉勤, 2007)。因此, 土地利用/土地覆盖形式由一种类型转换为另一种类型会伴随着大量的植被和土壤碳存储的变化(Foley *et al.*, 2005; Watson *et al.*, 2000)。研究表明, 由于原始林转化为次生林或森林生态系统退化以及森林或农田转化为草地和农田等, 发生在低纬度森林区域的土地利用/覆盖变化已经造成每年大约(1.65±0.4)Pg C 释放到大气中(Dixon *et al.*, 1994)。由于耕种措施的采用, 农田土壤有机质的分解速率加快, 因此, 无论是草地还是森林转化为农田后, 土壤的碳储量都会减少(Houghton and Goodale, 2004; Guo and

Gifford, 2002)。在湿地逐渐旱化过程中, 尽管植被生物量碳可能增加(例如, 草地湿地转化为林地), 但是除了一些沙质和裸露湿地外, 大多数情况下, 都会造成更多的土壤碳释放大气中(Mitra *et al.*, 2005)。

气候变暖通过影响生态系统净第一性生产力(NPP)和土壤呼吸(R_h)对植被碳库和土壤碳库产生影响, 同时还可以改变凋落物的产量及分解速率(徐小锋等, 2007)。一般认为, 气候变暖可增加植被碳库, 还可增加凋落物的量, 影响陆地生态系统的碳源和碳汇, 全球陆地生态系统表现为一个很弱的碳源, 同时碳循环的速率加快。随着全球气候变暖, 这种趋势变得更加明显(王春权等, 2009; 徐小锋等, 2007)。不同的生态系统土壤对气候变暖的响应是不同的。一般认为, 热带土壤有机碳含量相对较低, 气候变暖条件下, 土壤释放碳的作用不强, 而植物地下碳库进入土壤的作用比较强。所以, 气候变暖最终导致土壤碳库的增加。而在高纬地区, 气候变暖将导致土壤碳的大量损失, 并大大超过因为气候变暖所导致的碳增加量, 使土壤表现为碳源。这其中气候变暖对高纬度地区土壤碳库的影响最大(Keyser *et al.*, 2000)。

不同的管理措施也会造成陆地生态系统碳储量的变化。在巴西亚马逊的马瑙斯(Manaus)地区研究发现, 良好的管理方式使草地土壤中碳储量有所增加; 相反, 没有良好的管理甚至不管理的草地土壤碳储量严重下降(Cerri *et al.*, 1991)。可能原因是良好的草地管理措施使草的根系能够生长到更深的土壤, 由于深层土壤的根系分解速率较慢, 这些根系就保留在土壤中成为土壤有机质的一部分, 从而增加土壤的碳储量(Nepstad *et al.*, 1991)。森林转化为草地后, 如果不进行管理, 全球热带地区 0~40cm 深度内的土壤碳储存将减少 20%(Detwiler, 1999)。Canadell 等(2002)指出, 如果采用最佳的管理措施, 仅全球农田土壤每年就能增加 0.4~0.8Pg C 的固碳量。管理对土壤碳储量的增加具有重要影响(Eden *et al.*, 2005)。除了农业、林业和草地管理措施, 其他措施如湿地保护、增加城市森林面积、荒漠地带植被保护或栽种、适当火烧、苔原/冻土的保护等都可以增加系统碳固定或减少碳损失。

目前, 陆地生态系统土壤碳储量估算中均采用 1m 深度的土壤剖面数据, 这对于大多数矿物质土来说是适宜的。因为, 在矿物质土中有机碳含量随着深度的增加而降低; 但是, 对于有机质土来说是不适宜。因为, 深层有机质土有机碳含量很高(Jörn *et al.*, 2014)。例如, 分布于苔原和热带地区的泥炭土 3m 深度和 11m 深度土壤碳储量分别高达 1672Pg C(Tarnocai *et al.*, 2009)和 89Pg C(Page *et al.*, 2011), 是 1m 深度全球土壤碳储量估算值的 2 倍。还有研究表明, 采用 3m 深度土壤剖面数据估算的碳储量值是 1m 深度土壤碳储量估算值的 1.5 倍(Jobbágy and Jackson, 2000)。深层土壤碳库还可能受土地利用/覆盖变化的影响(Fontaine *et al.*, 2007)。

不同的研究采用的估算方法不同, 也是导致陆地生态系统碳储量估算值差异较大的重要原因。例如, 由于不同的全球植被碳储量研究结果是基于不同的模型和驱动数据进行独立模拟所得出的, 各模型的过程机理有很大不同。因此, 各研究结果具有一定程度上的差异(表 1-4)(孙晓芳等, 2013)。例如, LPJ-DGVM 假定养分元素如氮、磷、钾等供应充足, 植物生长中不受这些养分元素的限制, 而实际上生态系统碳蓄积的过程通常会受到养分元素尤其是氮元素的限制。因此, 导致该模型对植被碳储量的模拟结果偏大

(孙晓芳等, 2013)。与陆地生态系统植被碳储量估算研究相比, 土壤碳储量的估算方法中存在更大的不确定性(Jörn *et al.*, 2014; 陶波等, 2001)。土壤碳储量的估算中的不确定性主要来自以下几个方面: 第一, 土壤分类系统的不统一, 采样方法的差异, 以及选用不同的土壤碳蓄积量计算方法和参数估计方法使目前的土壤碳蓄积量的估算存在极大的不一致, 土壤实测数据不充分和缺乏连续、可靠、完整、统一的土壤剖面数据也使碳储量量测的可行性大打折扣(Yang *et al.*, 2014; 王绍强等, 2000); 第二, 土壤碳氮含量、质地、容重、根量等理化性质存在很大的空间差异, 气候、母岩、植被和土地利用对土壤碳库容量的综合影响也很难确定(Jörn *et al.*, 2014; 王绍强等, 2003); 第三, 由于数据来源、模型类型、输入参数等不同造成不同的模型估算结果存在较大差异。例如, 最近有学者比较了采用 11 个不同模型估算全球土壤有机碳储量的结果, 表明全球土壤有机碳储量估算值在 510~3040Pg C(Todd-Brown *et al.*, 2013)。

表 1-4 不同模型模拟的全球植被碳储量

模型	全球植被碳储量/(Pg C)	文献来源
LPJ	923	孙晓芳等, 2013
BIOME	785	Prentice <i>et al.</i> , 1993
IBIS1	550	Foley <i>et al.</i> , 1996
CEVSA	741	Cao and Woodward, 1998
IBIS2	557.4	Kucharik <i>et al.</i> , 2000
Review	500~950	Cramer <i>et al.</i> , 1999
CASA	651.1	Potter <i>et al.</i> , 1999
SDGVM	500~550	Woodward and Lomas <i>et al.</i> , 2004
ORCHIDEE	641	Krinner <i>et al.</i> , 2005

注: 来自孙晓芳等, 2013。

三、陆地生态系统碳储量研究趋势和热点

针对陆地生态系统碳储量研究中存在的问题及不确定性, 在今后的陆地生态系统碳储量研究应加强以下研究。

(一) 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳储量的影响

由于土地利用/覆盖变化对生态系统碳储量的影响涉及人类活动, 因此, 土地利用/覆盖变化预测模型(模拟人为因素造成的土地利用/覆盖变化)、植被动态模型(模拟自然因素引起的自然植被覆盖变化)和生态系统过程模型(模拟土地利用/覆盖变化造成的生态系统碳、氮、水和能量过程变化)三者的结合是未来的发展趋势(陈广生和田汉勤, 2007)。

(二) 气候变化对陆地生态系统碳储量的影响

关于陆地生态系统对气候变暖的响应, 已有大量的模型被用于研究。但是, 由于