

# 林草生态系统固碳增汇的增长潜力及交易机制

陈文汇, 李华

北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

**摘要** 巩固提升林草生态系统碳汇能力,是实现碳达峰、碳中和的重要行动。分析了中国林草生态系统碳储量现状和核算方法,运用固碳速率法对林草生态系统固碳能力进行计算,并采用灰色模型进行预测,研究表明,中国林草生态系统年固碳量和总面积呈现逐年增加趋势,合理增加森林和草原面积有利于提高林草资源固碳量,预计到2030年中国林草生态系统固碳量将增加至8.549亿t,总面积将增加至6.467亿hm<sup>2</sup>。结合中国林草碳汇交易市场发展现状和制约瓶颈,提出了合理规划林草面积、完善碳汇支持体系、加快建设碳汇交易市场、完善碳汇法律法制建设4个方面建议。

**关键词** 固碳增汇;林草碳汇潜力;灰色预测模型;交易机制

2021年10月,为应对全球气候变化的问题,国务院加强统筹并组织落实《2030年前碳达峰行动方案》,强调需加强生态系统碳汇基础支撑,充分利用国家林草生态综合监测评价成果,积极开展对生态系统固碳增汇潜力分析以及研究制定碳汇项目参与全国碳排放权交易规则。“十四五”期间,巩固和提升森林、草原、湿地等生态系统碳汇能力,是贯彻新发展理念和实现“双碳”目标的重要行动,可为中国生态文明建设和缓解气候变化作出重要贡献。

生态系统具有重要的固碳增汇潜力<sup>[1]</sup>,森林、草

原是中国重要的粮库、水库、钱库和碳库,林草兴则生态兴,目前中国林草生态系统资源清查资料数据较为详实,研究人员从经济高质量发展、乡村振兴、“双碳”目标等诸多视角展开研究,其中关于森林或草原单一生态系统的研究较多,而二者相结合的研究稍显欠缺。从生态系统尺度上看,各个生态系统之间存在交叉,具体碳储量应归属于哪一生态系统不能绝对区分,森林生态系统碳储量通常包括森林生物量、土壤碳储量、凋落物和枯枝落叶等非活体有机物的碳储量,以及林下覆盖物和枯枝树叶等有

收稿日期:2023-07-28;修回日期:2023-11-14

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2023SKY01);国家发展改革委委托项目(2022102001)

作者简介:陈文汇,教授,研究方向为农林经济理论与政策、碳汇核算及碳汇经济学,电子信箱:wenhui@bjfu.edu.cn

引用格式:陈文汇,李华.林草生态系统固碳增汇的增长潜力及交易机制[J].科技导报,2024,42(7):93-102;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.08.01294

机物在土壤中的留存碳<sup>[2-3]</sup>。而草原生态系统碳库通常包括植被碳库、凋落物碳库以及土壤有机质碳库,其中土壤有机质碳储量最大<sup>[4]</sup>。森林生态系统和草原生态系统存在重叠部分,一般包括森林和草原过渡部分的生态系统,也包括森林和草原上的河流、湖泊、沼泽等湿地系统。因此,对于如何计算林草生态系统重叠部分的碳储量,不同碳库类型碳储量存在差异,不同估算方法计算的碳汇量也有所不同。解决如何有效计算有助于研究人员及公众更好地理解、保护和利用中国各类生态系统,还有助于测

算林草生态系统的碳汇量,为林草生态系统固碳增汇事业提供参考借鉴。

碳汇交易的加持有助于进一步实现生态系统碳汇价值,为实现“双碳”目标和生态文明建设提供参考<sup>[5]</sup>。但目前中国碳汇交易机制尚不成熟,存在碳汇计量标准不统一、碳汇方法学不完善、社会公众及企业参与碳汇项目意愿低等问题,因此积极建立和完善生态统计量监测体系和方法学,探析中国生态系统碳汇交易机制路径,对充分发挥生态系统固碳增汇潜力具有重要意义和促进作用(图1)。

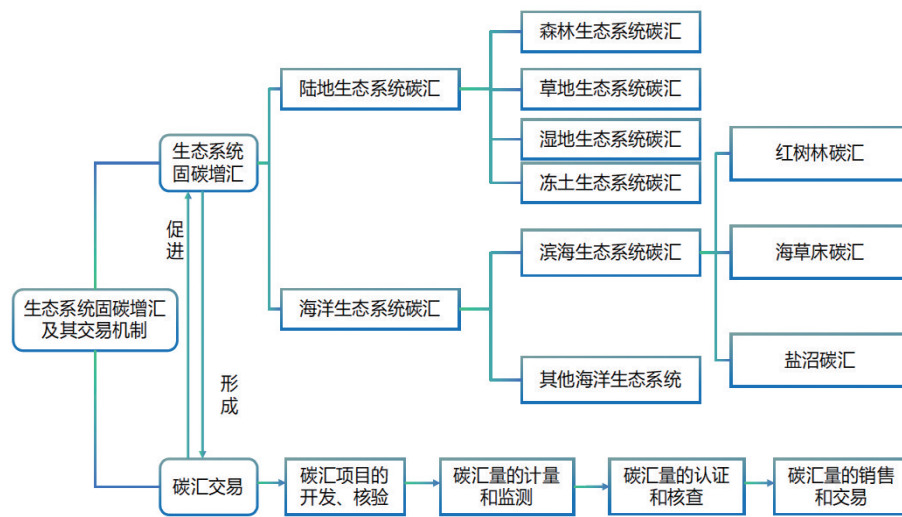


图1 生态系统固碳增汇及其交易机制关系

## 1 林草生态系统碳储量现状

林草生态系统作为中国重要的碳库,其固碳增汇潜力较大。目前中国森林面积2.31亿 $\text{hm}^2$ ,森林覆盖率达24.02%、森林蓄积量达194.93亿 $\text{m}^3$ ;草地面积2.65亿 $\text{hm}^2$ ,草原综合植被盖度达50.32%,林草植被总碳储量114.43亿t,其中林木植被碳储量为107.23亿t,草原植被碳储量7.20亿t。林草植被年固碳量3.49亿t,年吸收 $\text{CO}_2$ 当量12.89亿t。

方精云等<sup>[6]</sup>利用1949—1998年间7次森林资源清查资料,测算中国森林碳库碳储量(不含人工林)由20世纪70年代末期的4.38 PgC增加到1998年的4.75 PgC,共增加0.37 PgC。Xu等<sup>[7]</sup>测算1999—2003年中国人工林的总碳储量为0.7743 PgC,比

70年代初增加了3.08倍。王效科等<sup>[8]</sup>基于第三次全国森林普查数据,运用生物清单法,估算出中国森林碳储量在3.26~3.73 PgC。张颖等<sup>[9]</sup>基于第6次和第7次森林清查资料,运用蓄积量转换法测算中国森林生态系统碳储量,结果表明森林碳储量、碳汇量逐年增加,2008年森林碳储量为6.91 PgC,相比2003年,年均增长5.33%。张颖等<sup>[10]</sup>基于中国9次森林清查数据(图2),采用蓄积量法计算出中国森林单位面积蓄积量在70~80  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间波动,1993年后呈稳定上升趋势,碳储量由1976年12.51 PgC增加到2018年21.44 PgC,碳汇量在2008年后呈现快速增长趋势,表明中国森林生态系统固碳增汇能力不断增强。

草原总库碳储量占中国陆地生态系统的

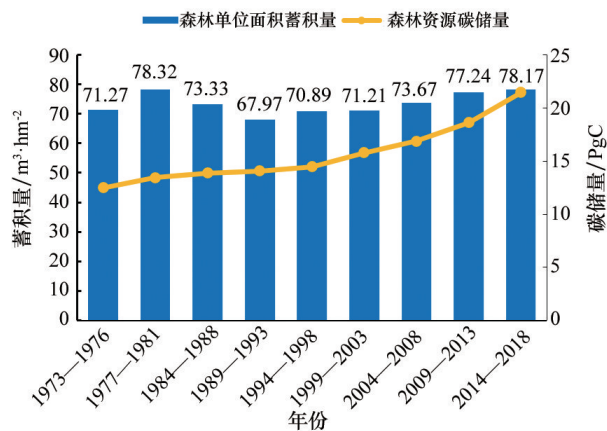


图2 基于9次森林清查数据测算的中国森林资源碳储量变化情况

16.7%,其中草原植被碳储量为中国陆地生态系统植被层碳储量的2.65%~13.58%,土壤有机碳碳储量为12.62%~64.59%。而草原碳汇估算结果具有较大不确定性,目前中国草原生态系统的年均碳汇量为7.04~84.00 TgC·a<sup>-1</sup>,约占整个陆地生态系统的10%,具有深厚的碳汇潜力<sup>[11]</sup>。从研究尺度看,从20世纪70年代起,国外研究人员就开始对全球草地生态系统碳储量进行估算<sup>[12-13]</sup>,目前国内研究人员从国家尺度上对草地生态系统碳储量研究相对较少<sup>[14]</sup>,绝大多数研究人员基于省域或地级市尺度研究草原碳储量分布特征及其影响因素<sup>[15-17]</sup>。

表1 中国草原生态系统碳储量和碳密度分布情况

草原面积/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	草原碳密度/(MgC·hm <sup>-2</sup> )		草原碳储量/PgC			数据来源与方法	文献
	植被	土壤	植被	土壤	合计		
405.9	11.5	132.4	4.7	53.7	58.4	全球草地生物量碳密度	[18]
167.0	3.4	99.9	0.6	16.7	17.3	过程模型	[20]
394.9	8.0	142.6	3.2	56.3	59.5	过程模型	[21]

## 2 林草生态系统固碳能力测算

碳汇或碳储量与林草生态系统固碳能力直接相关。森林生态系统作为陆地生态系统最大的碳库,准确估算其碳储量已成为气候变化研究领域的热点问题,但由于不同研究人员对森林生态系统的定义或范围、数据来源以及估算方法的差异性,估算结果往往不一致<sup>[22]</sup>,例如定义森林生态系统范围

Ni<sup>[18]</sup>研究表明中国草原生态系统碳储量为58.4 PgC,且土壤中固存的碳占整个草原生态系统碳储量的91.95%。此外还有研究表明中国草原生态系统碳储量为58.38 PgC。其中,植被碳储量为4.66 PgC,土壤碳储量为53.72 PgC<sup>[4]</sup>。上述测算结果存在不一致性,原因可能是不同研究人员对草原生态系统的定义不同,或是数据来源差异性,如基于固定样地抽取数据外推计算或基于遥感卫星数据测算等,亦或是核算的范围不同,如核算草原生态系统涉及有机碳时,不同草原类型的不同土壤测算深度等,上述情况均会对中国草原生态系统碳储量的核算造成一定的影响,但是可以肯定的是草原生态系统土壤固碳能力强。从草原分布地区看,中国草原85%以上的有机碳分布于高寒和温带地区;从草原类型看,不同草原类型碳储量不同,其中高寒草甸、高寒草原和温性草原的碳储量最大,高寒草甸拥有最大的植被和土壤碳储量<sup>[19]</sup>,占中国草原总碳储量的25.6%,高寒草原和温性草原的碳储量分别占中国草原总碳储量的14.5%和11.0%。沼泽草原、山地草原和亚热带—热带草丛由于优越的生长条件,地上部分生物量碳密度最大,但由于面积较小而总碳储量并不大。地下根系生物量碳储量与地上部分具有趋同性,沼泽草原、山地草原和亚热带—热带草丛的根系生物量碳储量较高(表1)。

时是否包括疏林地、散生木、枯死木、四旁树、枯落物和土壤有机碳等<sup>[23]</sup>;测算土壤有机碳时涉及不同的区域、气候带和测量的土壤深度等<sup>[24-25]</sup>;测算的数据来源,部分研究基于森林资源连续清查、二类调查和野外样地实测数据进行外推测算<sup>[26-29]</sup>,也有部分研究基于遥感影像数据进行测算<sup>[30]</sup>;在森林生态系统碳储量的计量方面,森林生态系统碳库主要有3种组分:森林植被、土壤、地表凋落物,国内外

研究人员做了大量研究,提出了包括生物量法(平均生物量法<sup>[26]</sup>、材积源生物量法<sup>[31-32]</sup>、生物量回归模型法和转换因子连续函数法<sup>[33-34]</sup>)、蓄积量法<sup>[10]</sup>、模型模拟法<sup>[35]</sup>和应用遥感估算法<sup>[21]</sup>等多种方法,其中生物量法无论在区域、国家尺度上,还是在森林生态系统尺度上,都被联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)等组织和世界各国广泛应用<sup>[36]</sup>,中国研究人员多以森林资源连续清查资料为主要数据源,利用平均生物量法,直接或间接估算植被生物量,再将生物量与植被含碳率相乘得出森林碳储量。

关于草原生态系统碳储量和碳汇研究。草原生态系统是陆地生态系统重要组成部分<sup>[30]</sup>,也是中国仅次于森林生态系统的第二大碳库,目前对其碳

汇和碳储量的研究集中在碳储量现状分析和碳汇潜力评价<sup>[37-39]</sup>以及开垦、刈割、放牧、施肥等人为管理措施对草原生态系统碳汇的影响<sup>[40-47]</sup>、气候变化对草原生态系统碳储量的影响等<sup>[48-49]</sup>,还有部分研究草地生态系统的固碳特征和分布特征<sup>[50-51]</sup>。关于草原生态系统碳储量的估算方法,学界尚未形成统一的估算方法,研究人员采用不同的技术手段和研究方法评价碳汇潜力有所不同,但在草原生态系统中各组分碳库测算的固碳能力大致相同。

目前关于林草生态系统重叠问题的研究基本空白,因此本文根据前人研究基础,采用《陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南》中的固碳速率法进行核算林草生态系统固碳量(表2)。

表2 林草生态系统固碳核算参数

年份	森林(及灌丛)植被固碳速率/ (tC·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	森林(及灌丛)土壤固碳速率/ (tC·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	草地土壤固碳速率/ (tC·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
2000年	0.53	0.34	0.02
2005年	0.64	0.41	0.02
2010年	0.75	0.48	0.02
2015年	0.84	0.54	0.02
2020年	0.94	0.61	0.02

注:数据来源于《陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南》,其中2005和2020年林草固碳速率参数由测算增长速率得到。

林草生态系统碳储量计算公式为:

$$FGSCS=FCS+GSCS \quad (1)$$

式中,FCS为森林(及灌丛)固碳量(tC·a<sup>-1</sup>),GSCS为草原固碳量(tC·a<sup>-1</sup>)。

$$FCS=FCSR \cdot SF \cdot (1+\beta) \quad (2)$$

式中,FCSR为森林(及灌丛)的固碳速率(tC·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>),SF为森林面积(hm<sup>2</sup>),β为森林(及灌丛)土壤固碳系数,取值0.646。

由于草地植被每年都会枯萎,其固定的碳返回大气或者进入土壤中,该部分与森林(及灌丛)生态系统中林下植被凋落物出现交叉重叠,且草原植被碳储量较小,占草原生态系统碳储量2.65%~13.58%,本文将其看作与森林生态系统重叠部分的碳储量较为合适,故只考虑草地的土壤固碳量。

$$GSCS=GSR \cdot SG \quad (3)$$

式中,GSR为草地土壤的固碳速率(tC·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>),SG为草地面积(hm<sup>2</sup>)。

根据公式(1)~(3)计算可得,截至2020年,中国森林生态系统年固碳量约为3.98亿t,草原生态系统年固碳量约为0.08亿t,林草生态系统具有较高的固碳能力,随着国家对林草生态系统修复投入的持续增加,其固碳增汇的潜力有望进一步提升,为中国实现“双碳”目标发挥新的贡献。林草生态系统的固碳增汇过程涉及的生物和生态学知识较为复杂,同时影响生态系统固碳能力的因素也在不断变化,基于此,本研究参考张颖等<sup>[10]</sup>的研究方法,采用GM(1,1)灰色预测模型对林草生态系统年固碳量进行预测分析。灰色预测法是一种基于数据潜在规律的预测方法,通过建立灰色模型对灰色系统进行预测,该方法具有操作简便、所需信息少、精

度高等优点。由于林草生态系统固碳速率参数的获取较为困难,研究的时间跨度相对较短,而灰色预测法适合处理样本数量有限的预测问题,因此在本研究中被选用。基于GM(1,1)预测模型构建变量对时间变量的一阶微分方程:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (4)$$

式中,  $x^{(0)}$  表示原始数列  $x^{(0)}$  经过一次累加后生成的数列;  $t$  为时间变量;  $a$  为发展灰数, 能够控制系统未来的发展态势,  $b$  为内生控制灰数, 用于反映数据变化间的强弱关系, 二者均是模型的待估参数。

模型具体操作步骤如下。

首先, 设原始数列  $x^{(0)}$ :

$$x^{(0)} = [x^{(0)}(i), i=1, 2, 3, \dots, n] \quad (5)$$

其次, 进行级比计算与检验, 若全部的级比值都位于区间  $\sigma(t)$  内, 说明数据适合模型构建, 级比的计算和检验公式为:

$$\sigma(t) = \frac{x^{(0)}(t-1)}{x^{(0)}(t)}, \sigma(t) \in \left( e^{-\frac{2}{n+1}}, e^{\frac{2}{n+1}} \right) \quad (6)$$

然后, 对原始数列  $x^{(0)}$  做累加运算生成一阶累加序列:

$$x^{(1)}(t) = \sum_{m=1}^t (x^{(0)}(m)), t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

接着, 生成  $x^{(1)}$  的均值序列  $z^{(1)}(t)$ , 构建一阶线性微分方程(式(4)), 利用最小二乘法求解模型中的待估参数  $a$  和  $b$ , 随之得出 GM(1,1) 预测模型的时间响应函数:

$$z^{(1)}(t) = \frac{1}{2} [x^{(1)}(t) + x^{(1)}(t-1)] \quad (8)$$

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (9)$$

最后, 依据公式求解得出预测值, 并用相对误差和后验差来检验模型拟合的优良度:

$$\hat{x}^0(t+1) = \hat{x}^0(t+1) - \hat{x}^1(t), t = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

通过数据分析后, 得到原序列的所有级比值都位于区间 (0.717, 1.396), 说明原序列通过级比检验, 适合构建灰色预测模型, 构建结果如下: 发展系数  $a$  为 -0.192, 灰色作用量  $b$  为 2.519, 后验差比  $C$  值为 0.017。

后验差比值是一种评估灰色预测精度的指标,

若后验差比值越小, 则说明灰色预测精度越高。根据一般标准, 当后验差比值  $C$  值  $< 0.35$  时, 说明模型精度高;  $0.35 \leq C$  值  $< 0.5$  表示模型精度合格,  $0.5 \leq C$  值  $< 0.65$  表示模型精度基本合格, 如果  $C$  值  $\geq 0.65$ , 则说明模型精度不合格, 本模型  $C$  值为  $0.017 < 0.35$ , 说明模型精度高, 结果可行。

模型拟合结果如表 3 所示, 相对误差值越小越好, 一般情况下小于 20% 即说明拟合良好, 该模型平均相对误差为 3.013%, 代表模型拟合效果良好, 故可据此对中国林草生态系统年固碳量进行预测, 其时间响应函数为:

$$\widehat{FGCSC}^{(1)}(t+1) = 15.47679167e^{0.192t} - 13.11979167 \quad (11)$$

式中,  $\widehat{FGCSC}$  为林草生态系统年固碳量,  $t$  取值为 0, 1, 2, 3, ..., 其中  $t=0$  时, 代表基期 2000 年,  $t=1$  代表 2005 年, 依次类推。

表 3 模型拟合结果

时间	原始值	预测值	残差	相对误差/%
2000年	2.357	2.357	0	0
2005年	3.105	3.276	-0.171	5.517
2010年	4.047	3.969	0.078	1.933
2015年	5.076	4.808	0.268	5.276
2020年	5.691	5.825	-0.133	2.340
平均相对误差	—	—	—	3.013

方法同上构建中国林草生态系统总面积时间响应函数:

$$\widehat{SFG}^{(1)}(t+1) = 248.0247826e^{0.023t} - 242.4347826 \quad (12)$$

式中,  $\widehat{SFG}$  为林草生态系统总面积, 其他变量取值同上。

根据图 3 灰色预测模型 GM(1,1) 结果, 中国林草生态系统年固碳量和总面积呈现逐年增加趋势, 预测数据显示, 2030 年中国林草生态系统固碳量将增加至 8.549 亿 t, 总面积将增加至 6.467 亿  $hm^2$ , 林草资源固碳量的增加离不开中国森林面积和草原面积的增加, 故中国在未来发展中应合理扩大林草绿化面积, 提高林草植被覆盖率, 充分发挥中国林草生态系统固碳增汇潜力, 提高生态系统的整体功能和稳定性。

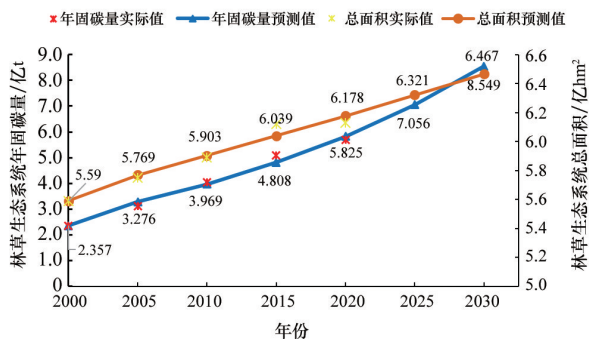


图3 模型预测结果

### 3 林草生态系统碳汇交易现状及发展瓶颈

#### 3.1 林草生态系统碳汇交易现状

林草碳汇具有明显的生态产品属性,碳汇交易是实现生态产品价值的重要实践之一,目前中国林草碳汇交易主要以林业碳汇为主,林业碳汇最早起源于清洁发展机制(CDM),如图4所示,2006—2013年为中国CDM项目高速发展期,2012年中国注册CDM项目数量最多,高达1819个,但是从2013年起,中国受制于欧盟对CDM项目的限制,注册项目数急剧下降,中国开始建立碳排放交易市场和自愿核证减排机制(CCER)。

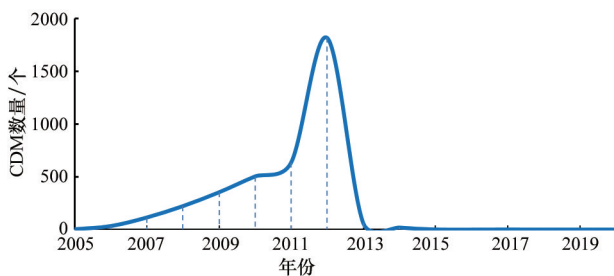


图4 2005—2020年中国CDM项目注册数

现阶段中国林业碳汇项目主要包括3类,一是CDM林业碳汇项目,二是CCER林业碳汇项目,三是其他自愿类项目,如林业自愿碳减排标准(VCS)项目、贵州单株碳汇扶贫项目等。近年来,中国林草资源丰富的地区大力推进林业碳汇试点项目,利用碳汇方法学对本地林业碳汇资源开展调查,并依据自身资源和地缘优势开展碳汇试点项目的研究和布局,取得了良好的成绩。如内蒙古绰尔森林工业有限责任公司自2014年起,投资并开发国际核

证碳减排标准(VCS)项目,实现了森林生态资源向产品的转化。截至目前内蒙古森工集团林业碳汇产品销售额已突破490万元,成为重点国有林区通过碳汇销售实现生态效益转化的典型代表。

2017年,中国CCER相关工作暂停,主要原因在于受理项目的方法较为复杂,难以认证,但中国关于管理办法的修订、方法学的研发以及市场建设与完善从未停止<sup>[52]</sup>。2023年10月20日,中国生态环境部联合市场监管总局发布了《温室气体自愿减排交易管理办法(试行)》,旨在规范全国温室气体自愿减排交易及相关活动。24日,又公布了4项温室气体自愿减排项目方法学,其中包括造林碳汇,随着越来越多的行业被纳入碳市场,CCER需求量将持续走高。林业碳汇项目在应对气候变化的过程中,充分考虑了生态和社会的多重效益,使其成为CCER中具有显著优势的碳信用产品。近期发布的造林碳汇方法学,通过简化额外性论证等环节,降低了项目开发的难度,为林业碳汇的快速发展提供了新的契机。

若该项目重启,林业碳汇作为生态价值高、正外部经济性大的项目子类,将会引起社会的重点关注。同时也为相关企业和机构提供了新的发展机遇和挑战,其需要更加注重技术创新和环保理念的提升,以满足碳市场需求和实现可持续发展。

草原资源具有良好的生态、经济和社会效益,但目前草原碳汇项目尚处于探索阶段,尚未正式进入碳交易市场,一是因为草原碳汇价值核算困难,二是尚未建立草原碳汇标准<sup>[53]</sup>,无法通过第三方机构的审定和核证。对此,季雨潇等<sup>[54]</sup>认为没有针对草原碳汇CDM项目开发的研究机构,专业性人才流失,会阻碍草原碳汇CDM相关项目发展的进程。郭健<sup>[55]</sup>指出积极创建草原碳汇交易平台,充分发挥草原碳汇价值,有利于推动中国碳汇交易市场的进步和发展。

#### 3.2 林草生态系统碳汇市场发展瓶颈

目前,中国碳汇市场面临着发展不健全的挑战。首先,碳汇制度不完善。尽管中国已经初步建立了碳汇交易和碳汇补偿制度,但这些制度主要集中在林业碳汇领域,而草原碳汇项目尚未进入碳汇

交易,草原碳汇相关制度与法律条例存在空白;相对于林业碳汇市场,国家也尚未制定草原碳汇计量监测标准和规程、建设草原碳汇监测网络体系,存在草原碳汇计量方法不明确、草原碳汇价值不清楚等基础性问题。其次,碳汇市场相关利益方参与不足。同林业碳汇相比,草原碳汇成本较低,时间较短,但仍未有大型能源企业愿意进军草原碳汇市场,其主要原因在于碳减排机制不够有效,碳汇开发和利用为企业带来的经济效益较少,难以激发企业参与的积极性。最后,林草碳汇技术人才匮乏。林草碳汇计量工作较为复杂,国家尚未出台统一的碳汇核算方法,基层缺少相关专家和人才。当前缺乏专设机构进行人才点对点对接,导致林草碳汇领域的发展受到了一定限制。

但不可忽视的是,中国碳汇市场仍存在着巨大的发展潜力。随着环保意识的不断提高和政策的不断加强,越来越多的企业和个人开始关注碳汇市场的机会和挑战。通过完善制度、加强相关利益方的参与和培养技术人才,中国碳汇市场有望实现更加稳健和可持续发展。

#### 4 林草生态系统碳汇及其交易市场发展建议

中国林草生态系统固碳增汇潜力较大,但碳汇市场仍不够健全,离实现“双碳”目标还有一定的差距。基于此,本文从以下4个方面提出建议。

第一,加强碳汇制度建设。推动林草生态系统的法制化,填补中国在森林和草原生态碳汇方面的立法空白,明确碳汇交易主客体的权利义务、补偿标准、补偿途径和法律责任,确保林草碳汇交易市场有序进行。成立第三方权威机构,对林草碳汇项目进行审核、认证,将其作为林草碳汇项目实施标准,保证项目规范化。出台草原碳汇补偿政策,完善林业碳汇补偿制度,适当给予林草碳汇生产者和组织相应的补偿,以期实现林草碳汇外部经济效应的内部化,激励企业或组织参与经营森林碳汇,促进林草碳汇交易。对有破坏林草生态建设行为的人予以处罚,以引导社会公众持续贯彻生态保护政

策,将书面化文件落实到现实行动中。

第二,提高企业碳汇项目参与意愿。完善税收激励政策,对参与林草碳汇的企业实施差异性税收优惠,降低其进入市场的交易成本。鼓励控排企业在规定的比例内优先购买林草碳汇项目的核证减排量抵消减排任务,适度降低控排企业参与碳交易的贷款资金要求,以此激励企业对林草碳汇项目的参与意愿。

第三,积极建设碳汇人才队伍。企业、农林高校和政府3方积极建立“产学研”平台,充分发挥林草业高层次技术人员在政策咨询、林草场规划、科研攻关等方面的技术支撑作用;对林草业科技成果进行梳理、整理、收集,探索建立一套科学的林草碳汇核算方法,将生态系统重叠部分予以梳理和核算;地方政府应积极运用人才引进政策,用优惠政策和就业福利等防止人才外流;相关企业以长远可持续发展眼光,培养草原碳汇CDM人才,鼓励参加实地调研考察,充分理解草原固碳增汇过程,为未来草原生态建设、碳汇发展做出积极贡献。林草资源丰富地区充分利用资源优势,吸引信贷金融资金投入,加快推进林草碳汇交易平台,实现点对点人才交流。

第四,提升林草固碳增汇能力。建立林草生态系统碳汇监测核算体系,加强科技支撑与国际交流合作。因地制宜合理规划林草绿化面积,重点关注乡村振兴水平较为薄弱的地区,加快推进生态环境建设,对未绿化村庄、因灾受损林地、草原荒漠化严重地区着重建设,提高林草植被覆盖率,通过碳汇项目入乡镇、林草碳汇宣传进农村等,带动林农参与林草绿化建设,为发展林草碳汇和实现乡村振兴提供宝贵机遇。科学编制林草质量经营政策,实施林草增汇措施。改变放牧强度、刈割频次、合理施肥等人为管理措施,不断提高草地生产力,防止草原碳汇向碳源转变,从而全面提高草地资源利用效率。积极开展天然林保护政策,提升天然林碳库质量及其固碳增汇能力,进一步完善政策措施巩固退耕还林还草成果。调整林草生态系统的适应性管理措施,探索“低碳型林草业”,达到减少林草生态系统温室气体排放,增加林草碳汇的目标。

## 参考文献 (References)

- [1] 简尊吉, 朱建华, 王小艺, 等. 我国陆地生态系统碳汇的研究进展和提升挑战与路径[J]. 林业科学, 2023, 59(3): 12-20.
- [2] 杜好. 丽水市森林碳储量和碳汇经济价值研究[J]. 浙江林业科技, 2023, 43(3): 87-93.
- [3] 张兴锐, 齐国辉, 陈利英, 等. 森林植被和土壤碳储量研究进展[J]. 青海农林科技, 2023(1): 56-61.
- [4] 尉迟文思, 郝伟罡, 刘春林. 我国草原生态系统碳储量现状浅析[J]. 内蒙古水利, 2021(12): 12-14.
- [5] 东淑华. 探索内蒙古碳汇交易机制[J]. 北方经济, 2023(2): 17-20.
- [6] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [7] Xu X L, Li K R. Biomass carbon sequestration by planted forests in China[J]. Chinese Geographical Science, 2010, 20(4): 289-297.
- [8] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- [9] 张颖, 周雪, 覃庆锋, 等. 中国森林碳汇价值核算研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 124-131.
- [10] 张颖, 李晓格, 温亚利. 碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38-47.
- [11] 塔娜, 王关区. 草原生态经济系统碳汇问题研究[J]. 北方经济, 2016(6): 64-67.
- [12] Ajtay G L. Terrestrial primary production and phytomass[J]. The Global Carbon Cycle, 1979(1): 129-181.
- [13] King A W, Post W M, Wullschlegel S D. The potential response of terrestrial carbon storage to changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. Climatic Change, 1997, 35(2): 199-227.
- [14] Ni J. Carbon storage in grasslands of China[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50(2): 205-218.
- [15] 马文红, 韩梅, 林鑫, 等. 内蒙古温带草地植被的碳储量[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 192-195.
- [16] 张琛悦, 赵霞, 辛玉春, 等. 青海省草地生态系统碳储量及其分布特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 286-292.
- [17] 陈剑清. 山西省草地生态系统生物量及碳储量的分布[D]. 太原: 山西农业大学, 2016.
- [18] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change[J]. Climatic Change, 2001, 49(3): 339-358.
- [19] 刘加文. 重视和发挥草原的碳汇功能[EB/OL]. (2018-12-07) [2023-06-10]. [http://grassland.china.com.cn/2018-12/07/content\\_40605586.html](http://grassland.china.com.cn/2018-12/07/content_40605586.html).
- [20] Li K R, Wang S, Cao M. Vegetation and soil carbon storage in China[J]. Science in China Series D Earth Sciences-English Edition, 2004, 47(1): 49-57.
- [21] Zhang L, Zhou G S, Ji Y H, et al. Spatiotemporal dynamic simulation of grassland carbon storage in China[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(10): 1946-1958.
- [22] 朱建华, 田宇, 李奇, 等. 中国森林生态系统碳汇现状与潜力[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3442-3457.
- [23] 陶吉兴, 谢秉楼, 季碧勇, 等. 浙江省森林生态系统五大碳库碳汇功能及结构特征[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2021, 20(4): 398-405.
- [24] 李敏. 森林土壤碳储量研究综述[J]. 林业调查规划, 2018, 43(4): 21-24, 50.
- [25] 张城, 王绍强, 于贵瑞, 等. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析[J]. 资源科学, 2006, 28(2): 97-103.
- [26] 涂宏涛, 周红斌, 马国强, 等. 基于第九次森林资源清查的云南森林碳储量特征研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(3): 185-193.
- [27] 高述超, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3558-3570.
- [28] Lin M Z, Song Y N, Lu D, et al. Geospatial environmental influence on forest carbon sequestration potential of tropical forest growth in Hainan Island, China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 807105.
- [29] 白昆立, 陈蕾伊, 邓洪涛, 等. 华南地区不同类型森林生态系统植被碳现状研究[J]. 林业与环境科学, 2022, 38(6): 102-108.
- [30] Zhang X Y, Jia W W, Sun Y M, et al. Simulation of spatial and temporal distribution of forest carbon stocks in long time series-based on remote sensing and deep learning[J]. Forests, 2023, 14(3): 483.
- [31] 郭泽鑫, 曹聪, 刘萍. 基于连清数据的广东杉木人工林生物量模型构建[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(8): 78-89.

- [32] 李放, 孙红召, 黄新峰, 等. 基于河南省第九次森林资源清查的乔木林碳储量研究[J]. 绿色科技, 2023, 25(17): 151-157.
- [33] 李虹谕, 杨会侠, 丁国权, 等. 中国森林碳储量分析[J]. 林业科技通讯, 2022(12): 29-32.
- [34] 王水, 陈怡研, 张艳侠, 等. 冀北山地森林碳储量探究——以雾灵山保护区为例[J]. 绿色科技, 2023, 25(10): 57-60.
- [35] Schroeder P. Can intensive management increase carbon storage in forests[J]. *Environmental Management*, 1991, 15(4): 475-481.
- [36] 吕浩, 彭春良, 吴惠俐, 等. 森林生态系统不同碳库碳储量估算方法综述[J]. 湖南林业科技, 2022, 49(6): 90-98.
- [37] Lyu X, Li X B, Wang K, et al. Strengthening grassland carbon source and sink management to enhance its contribution to regional carbon neutrality[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 152: 110341.
- [38] 李学斌, 樊瑞霞, 刘学东. 中国草地生态系统碳储量及碳过程研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1845-1851.
- [39] 陈晓鹏, 尚占环. 中国草地生态系统碳循环研究进展[J]. 中国草地学报, 2011, 33(4): 99-110.
- [40] Wang S P, Wilkes A, Zhang Z C, et al. Management and land use change effects on soil carbon in northern China's grasslands: A synthesis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3/4): 329-340.
- [41] 李凌浩. 土地利用变化对草原生态系统土壤碳贮量的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 13-15.
- [42] 马俐, 周志强, 王正文. 刈割和氮添加对松嫩平原羊草草原碳固持的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 87-94.
- [43] 刘倩, 张方敏, 陈吉泉, 等. 灌水和放牧对荒漠草原生态系统碳交换的影响[J]. 中国农业气象, 2019, 40(12): 737-746.
- [44] 赵巴音那木拉, 红梅, 梁存柱, 等. 施肥对荒漠草原生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J]. 草原与草业, 2019, 31(1): 44-53.
- [45] 王乐, 杜灵通, 马龙龙, 等. 人工灌丛化对荒漠草原生态系统碳储量的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 246-254.
- [46] 李愈哲, 樊江文, 胡中民, 等. 温性草原利用方式对生态系统碳交换及其组分的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 8194-8204.
- [47] 张一心, 赵吉, 王立新, 等. 不同管理措施下内蒙古草地碳汇潜势分析[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 318-323.
- [48] 王春磊, 晁晖, 孙迪. 气候变化对中国草地生态系统的影响[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2015, 37(1): 127-130.
- [49] 王乐, 杜灵通, 丹杨, 等. 不同气候变化情景下荒漠草原生态系统碳动态模拟[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 657-666.
- [50] 晨阳, 李慧融, 李冬楠, 等. 锡林浩特草原净生态系统碳交换量特征及源区分布[J]. 应用生态学报, 2023, 34(6): 1509-1516.
- [51] 萨茹拉, 李金祥, 侯向阳. 草地生态系统土壤有机碳储量及其分布特征[J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3604-3614.
- [52] 郭敏平, 李梦晨, 李洋. 我国林业碳汇交易发展探究[J]. 金融纵横, 2022(2): 39-45.
- [53] 陈向国. 构建草原碳汇标准, 发挥草原碳汇价值[J]. 节能与环保, 2022(3): 16-18.
- [54] 季雨潇, 马军. 内蒙古草原碳汇 CDM 项目发展研究[J]. 内蒙古统计, 2016(6): 36-38.
- [55] 郭健. 充分挖掘草原碳汇功能 助推经济社会和谐发展[J]. 现代农业, 2010(12): 3-4.

## Growth potential of carbon sequestration and carbon sinks increase in forest and grass ecosystem in China

CHEN Wenhui, LI Hua

School of Economics & Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract** This paper analyzes the current situation and accounting method of carbon reserves of the forest and grass ecosystem in China, and uses carbon fixation rate method to calculate the carbon sequestration capacity and gray prediction model of the forest and grass ecosystem. The results show that the annual carbon sequestration and total area of forest and grass ecosystem in China are increasing year by year, and the reasonable increase of forest and grassland area is conducive to increasing the carbon sequestration of forest and grass resources. It is expected that the carbon sequestration of China's forest and grass ecosystem will increase to 854.9 million tons by 2030 and the total area will increase to 646.7 million hectares. Then combined with China carbon sink market development status and the bottleneck, recommendations are presented in terms of reasonable planning forest area, carbon sink support system, construction of carbon sink market, and carbon sink law construction, in order to provide reference for China carbon sink accounting and carbon sink trading market development.

**Keywords** carbon sequestration and carbon sinks increase; carbon sequestration potential of forest and grassland; gray prediction model; trading mechanism ●



(责任编辑 徐丽娇)