DOI: 10.20103/j.stxb.202408061852
胡原,王其,曾维忠.森林碳汇与生物多样性保护协同:理论逻辑与提升路径.生态学报,2025,45(10):5053-5063.
Hu Y, Wang Q, Zeng W Z.Synergy between forest carbon sink and biodiversity conservation: Theoretical logic and improvement paths.Acta Ecologica Sinica,2025,45(10):5053-5063.

# 森林碳汇与生物多样性保护协同:理论逻辑与提升路径

胡　原[1],王　其[2],曾维忠[2,*]
1 四川农业大学管理学院, 成都　611130
2 四川农业大学经济学院, 成都　611130

**摘要**:积极推动森林碳汇与生物多样性保护协同增效,是世界应对气候变化与遏制生物多样性丧失的重要举措。基于协同理论,厘清了森林碳汇与生物多样性保护的辩证关系,剖析了二者协同面临的现实困境,并提出破解困境的实施策略。研究发现,森林碳汇与生物多样性保护协同的驱动机制有两方面,一是森林碳汇发展对生物多样性具有显著的直接与间接、正向与负向作用,使得二者难以剥离开来独立发展;二是生物多样性保护为森林碳汇可持续发展提供了新机遇。但由于生物多样性保护产品价值难以单独实现、区域高度重叠但项目主体未能协调统一、森林碳汇项目开发容易损害生物多样性等,致使二者协同面临价格"失灵"、主体"失联"、过程"失当"三大现实困境。为此,要以"森林碳汇+"为核心理念,将生物多样性保护以"私人物品"形式嵌入碳汇市场,推动森林碳汇市场交易主体拓展为"碳增汇+生物多样性保护"双重主体,形成森林碳汇项目开发各环节的生物多样性保护合力,进而实现森林碳汇与生物多样性保护协同发展与融合发展。

**关键词**:森林碳汇;生物多样性保护;协同

# Synergy between forest carbon sink and biodiversity conservation: Theoretical logic and improvement paths

HU Yuan[1], WANG Qi[2], ZENG Weizhong[2,*]
1 *College of Management*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*
2 *College of Economics*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*

**Abstract**: Actively promoting the synergies between forest carbon sinks and biodiversity conservation is a crucial initiative for the world to address climate change and mitigate biodiversity loss. Drawing on the synergy theory, this paper elucidates the driving mechanisms of the synergy between forest carbon sinks and biodiversity conservation, analyzes the dilemmas faced by this synergy, and proposes an implementation strategy to resolve these dilemmas. The study finds that the driving mechanisms of the synergy between forest carbon sinks and biodiversity conservation are twofold: firstly, the development of forest carbon sinks has significant direct and indirect, as well as positive and negative, impacts on biodiversity, making it challenging to separate and develop them independently; and secondly, biodiversity conservation offers new opportunities for the sustainable development of forest carbon sinks. However, due to the difficulty of realizing the value of biodiversity conservation products independently, the high degree of regional overlap, and the lack of coordination and unification in the project's main body, the development of forest carbon sink projects is prone to damaging biodiversity, etc., resulting in the

**基金项目**:国家社会科学基金一般项目(22BJY129);国家社会科学基金青年项目(23CJY061);教育部"春晖计划"合作科研项目(HZKY20220554)
**收稿日期**:2024-08-06;　　**网络出版日期**:2025-03-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zwz2011@foxmail.com

synergy facing price "failure", subject "disconnection", and process "inappropriateness". Consequently, the synergy between the two faces three major challenges: price "failure", subject "disconnection", and process "inappropriateness". For this reason, we should adopt "forest carbon sinks +" as the core concept, embed biodiversity protection as "private goods" in the carbon sink market, and encourage the transactional entities in the forest carbon sink market to expand into "carbon sinks + biodiversity protection" dual subjects, thereby forming a comprehensive forest carbon sink market. To promote the expansion of forest carbon sinks market trading subjects into "carbon sinks + biodiversity protection" double subjects, to form the biodiversity protection synergy in all aspects of forest carbon sinks project development, and to realize the synergistic development and integrated development of forest carbon sinks and biodiversity protection.

**Key Words**: forest carbon sinks; biodiversity conservation; synergies

应对气候变化和生物多样性保护是当前国际社会面临的两大紧迫任务,其中,森林碳汇不仅是世界应对气候变化的重要举措,而且日益成为协同应对气候变化和遏制生物多样性丧失双重挑战的重要策略。然而不容忽视的问题是,在具体实践层面,尽管生物多样性保护是森林碳汇项目规划设计、审核备案最常见目标,但市场机制主导下的森林碳汇开发,其核心目标与关键是实现碳交易,不仅难以自动关注生物多样性保护,甚至可能在项目组织建设、持续经营中破坏生物多样性[1],例如基于外来物种的单一树种造林、喷洒化肥农药等抚育措施以及不合理的采伐活动等。因此,研究如何在碳市场基本制度框架下,建立和完善森林碳汇与生物多样性保护协同机制,进而在最大限度满足多元主体追求自身合理利益的同时,以高效率、低成本的市场化路径,实现二者融合发展、协同增效就显得极为重要和紧迫。无论从贯彻落实习近平生态文明思想,加快构建双碳"1+N"政策体系来看,还是从发挥森林碳汇在应对气候变化和生物多样性保护中不可替代的作用来讲,都具有重大的理论和现实意义。

## 1 文献回顾

森林碳汇功能与生物多样性的关联研究,源于对生态系统服务权衡与协同关系的探索,一直是国内外多学科研究的热点领域。森林碳汇是指森林生态系统通过光合作用吸收大气中的二氧化碳并将其固定在植被和土壤中,从而减少大气中二氧化碳浓度的过程。学术界普遍认为,由于人类对生态系统服务的选择偏好,生态系统服务间往往存在复杂的非线性关系,主要包括此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系[2—5]。越来越多的证据显示,权衡与协同关系并非固定不变,具有很强的空间异质性、时间动态性,时空尺度的差异共同驱动权衡、协同关系的动态变化,而经济、管理和社会偏好是权衡与协同转换的决定性因素,基于某一特定生态系统服务类型的激励机制可能对其他生态系统服务类型产生负面影响[6—7]。众多研究结果表明,森林生态系统服务权衡关系的普遍性、尺度性、可逆性、非稳定性和外部性特征更为明显[8],实质是人类对森林生态系统服务消费取舍行为及其产生的结果。减弱生态系统服务之间的权衡,强化不同服务之间的协同对提升人类福祉至关重要,需要不断统筹考虑不同利益相关者偏好,权衡服务的侧重点和优先级,以实现整体生态系统服务惠益的最大化[9—11]。

进入 21 世纪,自《马拉喀什协定》首次明确规定"实施森林碳汇应当有助于生物多样性保护"之后,森林碳汇项目中的生物多样性保护日益受到普遍重视,并成为当前国际气候谈判中的新议题[12]。主流观点认为,森林碳汇项目常常可以兼具适应与减缓气候变化和促进地区可持续发展三重功能,对生物多样性保护具有积极作用[13]。由于碳汇效应的非持久性,包含多重效益的森林碳汇往往更具市场吸引力和竞争力[14—15]。越来越多的证据表明,森林碳汇项目是目前最为经济、简单、有效的应对气候变化途径,是碳市场第一大碳汇供给品种[16—20],但实现固碳增汇的林业措施对生物多样性可能产生积极或负面的影响[21—22]。认识到森林碳汇与生物多样性保护协同发展的重要性,现有研究从制度设计、市场运行机制及项目开发等多角度出发,揭示了二者之间的紧密联系(详见表 1 的系统梳理)。就森林碳汇相关政策法规而言,国际公约和国内政策法规为森

林碳汇活动中生物多样性保护提供了鼓励性规定[23],但缺乏具体操作性规定、强制性约束以及有效奖惩机制[24—25]。当前自愿减排机制有关森林的定义仍存在将草原等非森林生态系统转换为森林的风险,在不适宜的生物群落进行植树造林会引致入侵物种破坏原有非森林生态系统的平衡[26]。从森林碳汇市场运行机制来看,现有研究普遍认为,引入生物多样性专属标签机制可实现碳汇产品的差异化供给[27],并通过价格信号和交易规则激励市场主体投资具有生态效益的森林碳汇项目[28—29],但生物多样性价值核算方法及成本效益分析仍存较大争议[2,30]。在森林碳汇项目实践层面,合理的项目选址、固碳增汇措施以及持续的动态监测有助于增强生物多样性[31—32],但基于外来物种的单一树种造林、喷洒化肥农药等抚育措施以及不合理的采伐活动导致生物多样性保护效益收效甚微,甚至引发土壤环境风险和水体富营养化,进一步损害当地生物多样性[1,33]。

**表 1　学者基于不同视角开展的森林碳汇与生物多样性关联研究**

**Table 1　Research on forest carbon sinks and biodiversity linkages by scholars based on different perspectives**

| 研究视角<br>Research perspectives | 研究内容<br>Research content | 研究方法<br>Research methodology | 研究结论<br>Research conclusion |
|---|---|---|---|
| 森林生态系统服务<br>Forest ecosystem services | 森林碳汇功能与生物多样性权衡、协同关系 | 分层贝叶斯多物种占用模型[34]、提升回归树[35]、空间分析[2] | 协同潜力:高碳储量和生物多样性分布重叠区域协同成本较低[36]<br>协同挑战:二者重叠区域分布范围较窄[37] |
| 森林碳汇制度设计<br>Forest carbon sinks system design | 国内外森林碳汇政策法规与生物多样性规制协同 | 分层方法[38]、专家调查法[39]、多层级治理法[40] | 协同潜力:森林碳汇政策法规提供了生物多样性保护鼓励性规定[23]<br>协同挑战:缺乏具体的操作性规定[24]、强制性约束和有效的奖惩机制[25,41] |
| 森林碳汇市场运行<br>Forest carbon sinks market operation | 森林碳汇核证标准与生物多样性监管、森林碳汇交易与生物多样性价值核算、生物多样性保护认证下森林碳汇成本效益分析 | Logistic 回归分析[42]、净现值法[22]、情景模拟[22] | 协同潜力:生物多样性保护价值实现[27]、森林碳汇交易价格、交易规模和交易意愿显著增加[28—29]<br>协同挑战:市场监管不严格[30]、成本大于收益、激励机制不完善[2] |
| 森林碳汇项目开发<br>Forest carbon sinks project development | 项目设计、管理、监测与生物多样性保护成效 | 政策模拟[26]、问卷调查[43]、半结构式访谈[44] | 协同潜力:扩大森林覆盖面积[31]、增强关键栖息地连通性、构建物种种群交流廊道[14,45—46]<br>协同挑战:速生树种、树种结构单一、化肥农药施用等不当的森林管理措施忽视乃至损害生物多样性[1,33] |

既有研究深化了对二者协同潜力、挑战、风险等的认识,提供了丰富的经验证据,为本研究奠定了良好基础。然而,已有研究主要局限于二者协同的必要性探讨,对其内在驱动机制的理论分析不足,鲜有研究关注到二者协同的现实困境与实践策略。本文的边际贡献是:第一,尝试将森林碳汇与生物多样性保护纳入同一研究分析框架,着力探讨如何借助相对成熟的森林碳汇市场,实现生物多样性生态服务价值多元化、市场化补偿,进而健全森林碳汇与生物多样性保护协同机制并制定相应政策,达成协同目标。第二,在从学理上深化森林碳汇与生物多样性保护协同机制理论预期的基础之上,重塑以实现生物多样性保护能够以“私人物品”形式嵌入碳市场为核心要义的“制度—价值—主体—过程”协同路径,以破解二者协同面临的价格“失灵”、主体“失联”、过程“失当”困境。不仅可为政府运用市场化政策工具,有效推进森林碳汇与生物多样性保护融合发展、协同增效提供创新思路、科学依据以及政策建议,对草原碳汇、湿地碳汇、海洋碳汇等与生物多样性保护的协同机制构建也具有积极借鉴价值,而且有望为我国加快构建双碳“1+N”政策体系,乃至协同履约《联合国气候变化框架公约》和《生物多样性公约》提供积极参考。

## 2　森林碳汇与生物多样性保护协同的理论逻辑

森林碳汇与生物多样性保护之间存在紧密的协同(相互增益)与权衡(此消彼长)关系,具体而言,权衡关系指森林碳汇或生物多样性的增加,会相应地引起另一个的减少;协同关系指森林碳汇与生物多样性的供给

同时增加或减少。推动二者由权衡关系向协同关系转变,是实现二者融合发展、协同增效的根本保障。

协同理论主要应用于研究开放系统中各要素之间如何通过协同作用实现系统的整体自组织和平衡[47],是阐释森林碳汇与生物多样性保护协同关系的重要理论支撑。将森林生态系统视为一个整体,森林碳汇和生物多样性保护协同的理论逻辑源于二者间相互依存的功能属性:森林碳汇通过适应与减缓气候变化,直接或间接创造了有利于生物多样性恢复的生态环境;而生物多样性的提升则增强了森林生态系统的适应性和稳定性,有助于巩固森林固碳增汇能力。二者协同效应依赖于森林碳汇项目开发与生物多样性保护的有序互动和激励相容:在项目设计阶段,将生物多样性保护纳入规划可优化种植结构,避免单一物种种植的生态风险;在项目实施阶段,优先选择本地树种或混交林的造林方式能够提升生态系统的复杂性和适应性;在管理阶段,通过引入生物多样性监测和评估机制,可确保生物多样性保护目标与固碳增汇目标的长期一致性。与此同时,生物多样性保护又能提升项目开发供给力、增强碳汇市场竞争力、提高生态产品吸引力,为森林碳汇可持续发展带来新的机遇,形成互惠增益的正向循环(见图 1)。

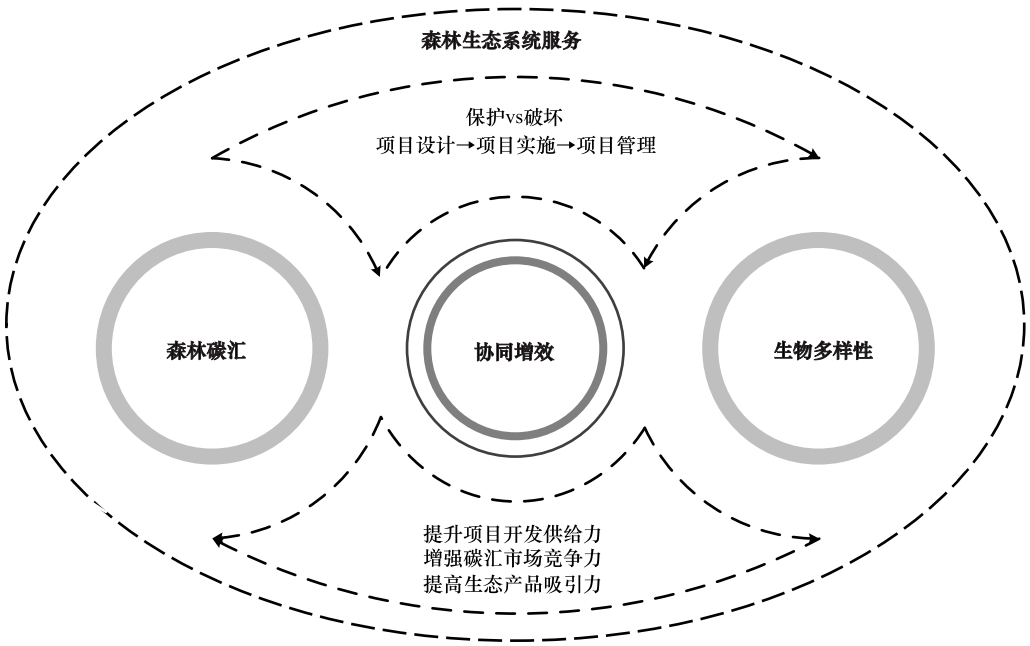


**图 1 森林碳汇与生物多样性保护协同的内在逻辑**

**Fig.1 The inner logic of synergies between forest carbon sinks and biodiversity conservation**

### 2.1 森林碳汇与生物多样性保护的权衡与协同关系

#### 2.1.1 森林碳汇功能与生物多样性保护

森林碳汇功能对生物多样性并无直接影响,但能通过调节碳平衡有效减缓气候变化,进而对生物多样性保护产生正向反馈作用[48]。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)于 1990 年的评估报告显示,气候变化会导致生物多样性的丧失。反过来,生物多样性越丰富,自然资源的碳汇潜力也越大。森林的物种多样性对其碳汇功能有着直接而积极的影响,具备丰富物种多样性的森林生态系统通常具有更高的碳储存能力[49]。物种丰富度有助于森林资源利用和养分保持,从而使每单位面积的碳储量增加[50]。且森林碳储量和碳通量的变动幅度会随着物种丰富度的增加而减小,即物种多样性使得森林碳汇功能变得更加稳定和可持续[51—52]。二者良性循环,彼此协同增益,达到减缓气候变化和保护生物多样性的双赢目标。而低物种多样性的森林则需要更长时间才能产生净碳增益,并且最终反映在地上生物量和土壤有机碳储量比本地原始森林、次生本地森林要少[53—54]。此外,外来树种还会消耗土壤养分,通过降低长期生产力而对森林碳汇功能的可持续性产生负面影响[55]。单一树种组成的森林碳储量更容易受到病虫害等环境压力

的影响,使得森林从碳汇转变为碳源,打破原有森林的净碳平衡[56],造成气候变化加剧和生物多样性丧失的双输困境。

**2.1.2**　森林碳汇项目与生物多样性保护

森林碳汇项目对生物多样性的影响主要集中在项目设计、项目实施以及项目管理三个环节。首先,在项目设计阶段,将生物多样性保护作为目标之一纳入规划。自《马拉喀什协定》首次明确实施森林碳汇项目的各项林业活动应当有助于生物多样性保护后,大多数项目从定性角度设计了生物多样性保护目标,但由于激励和监管机制的不健全,此类项目设计对生物多样性保护的效果有限。究其原因,此类项目设计缺乏量化的目标,也没有项目区生物多样性基线数据,难以为生物多样性保护成效提供有力证据。为确保保护效益的"真实性",一类从定量角度设计的补充认证标准在自愿碳市场日益活跃,诸如气候、社区和生物多样性标准(Climate, Community and Biodiversity Standards, 以下简称 CCB 标准)为生物多样性的"额外性"提供了保障。其次,在项目实施阶段,森林碳汇项目通过提高森林覆盖率和质量增加碳汇量,同时改善生态系统连通性,构建物种交流廊道以保护栖息地。然而,受经济利益驱动,部分项目优先选择转基因速生树种以追求碳汇量快速增长,因树种单一及对本地生物的挤出效应,可能导致生物多样性受损。最后,在项目经营管理阶段,不同森林经营方式也会对生物多样性产生差异化的影响。不合理的森林采伐方式或采伐规模,都会打破原有的森林生态系统平衡,进而影响生物多样性[21,41,57]。此外,使用化学药剂防治病虫害虽有助于树木健康,但可能抑制其他物种的繁衍[25]。

与此同时,众多理论研究与实践结果显示,生物多样性保护对减缓和适应气候变化具有双重积极作用。一方面,生物多样性保护可以维持或提高森林生产力,进而有助于提升固碳增汇能力[58—59]。另一方面,生物多样性丧失会减弱其"碳汇"功能,甚至演化为"碳源"[60—61]。强化科学技术应用、减少对生物多样性造成不利影响的林业活动,有助于增强生物多样性保护适应气候变化的能力[62—63]。在推动应对气候变化的行动中,应充分考虑生物多样性保护,不断推动履约协同、规则协同、部门协同、立法协同、政策协同等[64—65]。

**2.2**　生物多样性保护为森林碳汇可持续发展提供的新机遇

生物多样性兼具地域分布的全球性、学科交叉的复杂性、管理部门的综合性以及综合效益的公共性等特征,单一强调生物多样性保护难以实现其预期目标和成效。森林碳汇是基于生态补偿理论所设计的政策工具,在其同步推动生物多样性保护目标实现的同时,生物多样性保护也能够为森林碳汇可持续发展提供新机遇。二者的相互作用关系使得应对气候变化与保护生物多样性协同增效成为必然趋势。

**2.2.1**　有利于推动森林碳汇项目产品增值,提升项目开发供给力

商品价格的上涨将导致商品供给的增加。就供给端而言,森林碳汇可持续发展关键在于项目开发运营的可持续供给。将生物多样性保护这一生态价值纳入森林碳汇项目,能够直接增加碳汇的附加值,提高项目开发运营的预期经济收益,进而吸引更多项目业主加大森林碳汇供给。此外,众多研究表明,生物多样性的丰富程度与森林固碳能力具有紧密联系[54,66]。在项目设计、实施过程中纳入生物多样性保护,还能间接提高森林碳汇量,以增加森林碳汇项目的碳汇额度,同样会推动项目经济收益的增加。在实践层面,我国云南省开展的"菲氏叶猴保护地低碳生态示范村项目"将生物多样性保护纳入项目方法学,通过保护菲氏叶猴栖息地和种植本地树种,提升森林生态系统的功能性和碳汇量。由于项目区域内碳汇减排量被量化为碳汇产品,该项目在市场上形成了兼具碳汇价值和生物多样性保护附加值的高质量碳汇产品,为参与者创造了更高的经济收益,也进一步吸引了更多社区和企业投资者的参与,提升了项目供给的可持续性。

**2.2.2**　有利于拓展森林碳汇项目多重效益,增强碳汇市场竞争力

竞争优势理论强调,差别化战略能够提高市场竞争力,而森林碳汇较强的市场竞争力得益于其多重非碳效益。就市场交易层面而言,在短期内,相较于常规能源、工业部门的碳交易,森林碳汇项目开发往往缺乏竞争优势,但由于其兼具减缓和适应气候变化、植被恢复及生物多样性保护、促进社区可持续发展的多重非碳效益,开展造林再造林、减少毁林和森林退化所致排放量以及改进森林管理减少碳排放,日益成为人类合作应对

全球气候变暖的重要政策措施,这是其在整个碳汇市场占有一席之地的关键。因此,将生物多样性保护纳入森林碳汇项目目标,使得项目多重非碳效益得以实现,有助于进一步提升森林碳汇在碳交易市场上的竞争力。从全球实践来看,多重效益森林碳汇项目已经展现了其在碳交易市场中的潜力和竞争优势。例如,哥伦比亚的咖啡农林复合经营项目,通过保护生物多样性热点地区原始森林减少毁林排放,同时以生态友好的方式种植咖啡,兼顾碳汇与生物多样性保护效益,赢得高端市场的认可,并激励更多农民参与森林保护。再如,我国诺华川西南森林碳汇项目通过恢复四川凉山退化土地上的森林生态系统实现固碳目标,同时以保护大熊猫等濒危物种为切入点,增加生物多样性保护的附加价值。通过整合多重生态效益,项目吸引了国际资本和外资企业的积极参与,成为提升区域性碳汇项目市场竞争力的重要典范。

**2.2.3** 有利于拉动森林碳汇项目购买需求,提高生态产品吸引力

消费者购买商品是为了满足效用最大化。就需求端而言,单一的碳汇生态价值为购买方带来的效用往往有限,使得潜在的需求主体有限,且需求主体对森林碳汇项目的购买需求不高。而将生物多样性保护功能纳入森林碳汇项目,不仅能够直接增加碳汇产品为购买方带来的直接效用,还可以增加碳汇产品的附加值,提高碳汇产品在碳汇交易市场中的吸引力。由此,购买主体对此类森林碳汇产品的购买需求上升,还能将潜在的生物多样性需求主体转移至森林碳汇市场中,成为新的森林碳汇购买主体,使得森林碳汇交易市场得以进一步拓展。在实践层面,顺丰集团在四川省色达县开展的森林碳汇项目,通过生态修复与社区关怀相结合的模式,不仅满足了企业的碳中和需求,还吸引了更多关注社会责任的企业和个人购买其碳信用。项目引入在线互动平台“顺丰森林”进一步降低公众参与门槛,通过虚拟种树和碳排放计算等功能,将森林碳汇产品的购买群体延伸至企业员工和普通消费者。这种实践成功将生物多样性保护与森林碳汇市场相结合,提升了市场覆盖面和公众参与度,有效拓展了森林碳汇的市场需求。

**2.3** 森林碳汇为生物多样性保护带来的新机遇

**2.3.1** 森林碳汇交易市场成为生物多样性保护价值实现的有效载体

生物多样性作为公共物品,其产权并不明晰,这使得其保护价值难以通过市场机制实现。根据科斯定理,若正外部性的供给者与受益者之间不存在交易费用,且其中一方拥有明确产权,则资源可实现最优配置。即将生物多样性保护的产权界定给项目开发主体,生物多样性保护生态效益(正外部性)就能通过森林碳汇市场交易转化为经济效益(内部化)。项目开发主体不仅能够获得碳汇交易的直接收益,还可以通过明晰产权得到额外的生物多样性保护补偿。由此,森林碳汇交易市场成为生物多样性保护价值实现的有效载体,生物多样性保护不再是一种被动式的社会环境责任,而成为促使项目开发主体主动参与生物多样性保护的经济激励。澳大利亚较早认识到碳汇交易在实现生物多样性保护价值中的作用,并率先开展了“碳+生物多样性”试点项目(Carbon+Biodiversity Pilot,CBP),在实践中取得了显著成效[66]。该项目通过合同鼓励土地所有者实施生态修复措施,如种植本地树种、恢复生态走廊和改善退化地。碳信用由澳大利亚碳信用注册机构认证并进入市场交易,生物多样性价值则根据生态修复成效评估生成生物多样性信用,由政府或企业购买,用于履行环保承诺或提升社会责任形象。通过将碳信用与生物多样性信用合并为单一产品出售,CBP 实现了碳汇与生态服务的市场化定价与价值流通,为二者协同增效提供了实践参考[67]。

**2.3.2** 森林碳汇项目开发规范为生物多样性保护提供了制度激励

出于对生态系统完整性和生态安全的考虑,国内外政策法规、项目审核备案规定和项目开发方法学明确了项目开发不得对生物多样性造成负面影响的底线要求[25,68]。遵守这些规定是项目能否获得正式备案和运行的先决条件,这意味着项目开发主体必须在项目开发全过程考虑对生物多样性的影响,以符合相关环境评估的标准和审核备案程序。这些要求往往由政府或相关国际组织强制执行,以确保森林碳汇项目不仅能达到固碳增汇的目的,还能对生物多样性产生积极效应。根据制度主义理论,项目开发主体为获取碳汇经营的合法性收益,会被迫遵守相关法律法规和行业规范对生物多样性保护的强制性要求,否则将遭受市场准入限制的非合法性惩罚。因此,森林碳汇项目开发规范成为有效保护生物多样性的制度激励。

## 3　森林碳汇与生物多样性保护协同的现实困境

前文基于森林碳汇与生物多样性保护的辩证关系论述了二者协同的理论逻辑,在一定程度上阐明了森林碳汇与生物多样性保护之间具有理论的内在自洽性与合理性。与此同时,其内在逻辑还可以从二者当前所面临的实践困境着手分析,进一步论证二者协同增效在实践层面的必要性和必然性。

### 3.1　价格“失灵”:生物多样性保护产品价值难以单独实现

生物多样性保护低效很大程度上归因于产权不明,其生态价值难以转化为经济价值。根据产权理论和外部性理论,生物多样性保护兼具非排他性和非竞争性特征,其本质为公共生态产品,产权难以清晰界定,其价值则难以通过市场机制实现,导致生态产品的价格“失灵”问题。森林碳汇中生物多样性保护“失灵”的根本原因在于其生态服务价值“非市场化”。长期以来,我国保护生物多样性的主要举措是建立自然保护区等就地保护,通过政府手段实现生物多样性保护目标。但此类路径往往面临社会公众参与率不高、主体响应积极性不强、保护成效稳定性和持续性不足等现实问题。与此同时,由于企业和社会公众的碳汇需求单一,森林碳汇的市场价格总体偏低,市场交易受阻,如何促进碳汇增值、提高项目开发主体收益和积极性是保障森林碳汇市场持续健康运营的迫切问题。因此,借助碳交易市场,通过“有机碳”标签帮助碳汇产品增值,实现森林碳汇与生物多样性保护的价值协同,推动森林生物多样性保护与碳汇两个生态产品价值的共同实现,是解决生物多样性价值实现难题,促进生态补偿市场化、多元化的有益尝试。

### 3.2　主体“失联”:区域高度重叠但项目主体未能协调统一

森林碳汇与生物多样性保护是生态资源富集区域开发生态项目的共同目标。项目实践中,森林碳汇项目区与生物多样性保护生态功能区往往存在高度重叠,大多选址在森林资源富集区。但作为《联合国气候变化框架公约》和《生物多样性公约》的共同缔约国,我国应对气候变化和生物多样性保护的履约机构和实施主体尚且不同。森林碳汇项目业主一般为造林企业单位,生物多样性保护生态功能区主要由自然保护区政府管理机构负责经营管理,二者在项目设计、项目实施、项目评估等过程中往往相互独立,互不干涉。再加上两者开发生态项目的目标、方法、权责不尽相同,对生态资源信息掌握也难免存在差异,导致森林碳汇于生物多样性保护难以协调统一。

### 3.3　过程“失当”:森林碳汇项目建设容易损害生物多样性

生物多样性保护是森林碳汇项目开发的预期目标,但在实践操作层面可能破坏生物多样性。理论上,以造林再造林、森林经营等林业活动为主要内容的森林碳汇项目,不仅能够通过改善物种的生存环境直接保护生物多样性,还可以通过森林抚育间伐等管理活动间接促进生物多样性保护。然而,在市场化驱动下,实践过程中的森林碳汇项目可能为追求碳汇收益,而采取损害生物多样性的经营管理方式。例如,使用人工林代替天然林、速生树种代替本地树种等,这些举措虽然在短期内能够获取更多的碳汇收益,但却不利于生物多样性保护,甚至造成损害。

因此,如果能够借助森林碳汇项目,将生物多样性保护以“私人物品”形式嵌入碳市场,则会推动其生态产品价值得以实现,形成二者共赢的协同效应。这构成森林碳汇与生物多样性保护协同的理论逻辑。当然,需要注意的是,过分强调生物多样性,则会直接增加市场化森林碳汇项目的运营成本,降低项目效益,如何正确处理好二者之间的均衡关系是森林碳汇与生物多样性保护协同的逻辑外延。

## 4　森林碳汇与生物多样性保护协同的实践路径

结合当前森林碳汇与生物多样性保护协同面临的价格“失灵”、主体“失联”与过程“失当”问题,可以从制度协同、价值协同、主体协同、过程协同的角度探讨推动二者协同增效的实践路径。充分借鉴发展有机农产品的经验做法,本着“政府主导、企业主体、市场运作、公众参与”的基本思路,设计以“森林碳汇+”为核心理念,以升级版的“碳增汇+生物多样性保护”有机森林碳汇市场建设、项目开发、产品交易为重点的试点方案

(见图 2)。以期为促使生物多样性保护能够以“私人物品”形式嵌入碳市场,以及市场认证、价格形成、信息公开、风险防范等机制创新提供参考。

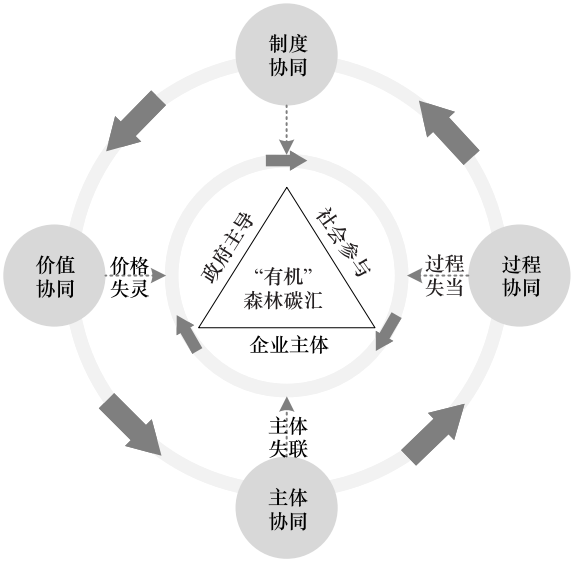


**图 2 森林碳汇与生物多样性保护协同路径**

**Fig.2 Synergistic pathways for forest carbon sinks and biodiversity conservation**

### 4.1 制度协同路径

在顶层设计上,森林碳汇与生物多样性保护是两个独立的制度体系,要实现二者协同增效,前提是要从制度层面确立二者的协同关系。一是政策制度协同。从我国已有的相关政策来看,二者已具备政策协同的基本条件。生态环境部等 17 部门联合印发的《国家适应气候变化战略 2035》将陆地生态系统生物多样性保护目标纳入其中。国家林业局颁布的《关于推进林业碳汇交易工作的指导意见》明确要求森林碳汇交易应遵循增加生物多样性的基本原则。以此为基础,统筹《中国生物多样性保护战略与行动计划》与《温室气体自愿减排交易管理办法》等相关政策,并进一步将生物多样性保护具体要求纳入森林碳汇应对气候变化政策体系,支持具有生物多样性保护效益的森林碳汇优先纳入全国碳排放权交易市场,有助于强化二者协同政策落地实施。二是法律制度协同。将森林碳汇与生物多样性保护目标共同写入《应对气候变化法》和《中国生物多样性司法保护》文件中,并在《森林法》和《自然保护区条例》中明确森林碳汇概念的同时,强调生物多样性对减缓和适应气候变化的作用。在推动森林法规和森林管理制度成为森林碳汇功能规则保障的基础上,积极与《关于推进林业碳汇交易工作的指导意见》和《温室气体自愿减排交易管理办法(试行)》等政策接轨,进而强化森林碳汇协同应对气候变化与保护生物多样性的法治保障。

### 4.2 价值协同路径

以“森林碳汇+”为核心理念,将生物多样性保护以“私人物品”形式嵌入碳汇市场,进而实现森林碳汇与生物多样性保护价值协同。一是优化完善森林碳汇价值核算体系,将生物多样性保护价值纳入核算指标,促使生物多样性保护附加值得以嵌入森林碳汇量的价格之中,打造优质碳汇产品,进而推动森林碳汇项目中生物多样性保护价值通过市场机制得以实现。二是完善森林碳汇市场交易机制,实现生物多样性价值转换。当前国际碳汇市场交易中,通过生物多样性额外认证的森林碳汇项目,无论是交易比例还是交易价格都占据榜首,生物多样性赋予了森林碳汇进一步增值的空间。可依此交易规律制定生物多样性保护认证的森林碳汇项目市场准入标准,探索其市场交易渠道以适应多元化市场需求,促进生物多样性价值通过森林碳汇项目交易实现其市场价值的转换。

### 4.3 主体协同路径

要推动森林碳汇市场交易主体拓展为“碳增汇+生物多样性保护”双重主体,进而实现森林碳汇与生物多样性保护主体协同。在实践层面,政府、企业、项目业主是森林碳汇市场交易的核心主体。一是将森林碳汇与生物多样性保护共同纳入政府的生态建设目标,作为政府人员职位晋升、绩效奖励的参考依据,激励政府主体在政策设计与项目支持层面协同关注森林碳汇与生物多样性保护。二是在一定程度上约束限排企业购买未包含生物多样性保护目标的森林碳汇量用以抵消碳排放额度,通过价格补贴等政策,引导企业购买通过生物多样性保护认证的森林碳汇量。三是充分利用市场机制,基于森林碳汇项目开发中生物多样性保护目标,细分“优质”碳汇与“普通”碳汇。根据经济学的需求定律,分别设立价格区间,实现优质优价,提高包含生物多样性保护目标的森林碳汇项目供给量。引导项目业主在森林碳汇项目开发过程中主动关注生物多样性保护,

由“森林碳汇开发”主体转变为“森林碳汇开发+生物多样性保护”双重主体。

### 4.4　过程协同路径

森林碳汇项目是森林碳汇市场交易的重要载体。要实现森林碳汇与生物多样性保护过程协同,需立足于森林碳汇项目开发全周期视角,在项目设计、实施和监测环节,明确生物多样性保护目标、规范生物多样性保护林业措施、纳入生物多样性监测计划。在森林碳汇项目设计中,制定明确的生物多样性保护目标,设计科学性、普适性、操作性强的生物多样性监测指标和监测计划。在森林碳汇项目实施环节,严禁破坏生物多样性的林业活动,例如,造林再造林项目中的单一速生树种种植、森林郁闭度过高等,森林经营项目中的低质量森林抚育间伐、过度喷洒农药和施肥等。在森林碳汇项目监测环节,根据项目设计中的生物多样性保护目标,定期监测评估项目开发的生物多样性保护成效,对生物多样性保护达标的优质森林碳汇项目,优先、优价纳入碳汇市场交易。最终形成森林碳汇项目开发各环节的生物多样性保护合力,实现森林碳汇与生物多样性保护过程协同效应最大化。

## 5　总结与展望

综上所述,森林碳汇与生物多样性保护具有融合发展、相互增益的潜力,是实现气候变化应对和生物多样性保护协同治理的重要途径。多重效益的组织特征使森林碳汇与生物多样性保护具有内在的理论自洽性,为二者协同机制的构建提供了基础条件,使森林碳汇能够在应对气候变化与生物多样性保护之间扮演载体的角色,一方面成为应对气候变化的实践载体,通过碳增汇以适应和减缓气候变化;另一方面也成为生物多样性保护的市场化载体,通过碳市场促成生物多样性保护生态服务的价值实现。通过二者协同机制的构建,将生物多样性保护融入森林碳汇的目标制定、价值核算与市场交易,这有利于增强森林碳汇的市场竞争力,降低生物多样性保护成本,为生物多样性保护生态服务的价值实现提供市场渠道。

但是,在推动森林碳汇与生物多样性保护协同的同时,还要避免陷入几大误区:一是森林碳汇与生物多样性保护目标主次颠倒。要始终将森林碳汇放在首位,以森林碳增汇为根本,兼顾生物多样性保护目标,不能片面追求生物多样性保护,致使森林碳汇项目本质发生改变。二是单一强调运用市场机制推动森林碳汇与生物多样性保护协同,忽略政府主体的引导作用。要综合运用政府调控和市场机制,充分发挥政府主体在产品认证、价格引导、政策保障等方面的关键作用,积极引导社会公众对生物多样性保护的关注与参与,进而推动生物多样性保护进入森林碳汇交易市场,实现价值转化。三是忽视森林碳汇与生物多样性保护协同的空间适用性,未体现地区差异。要进一步挖掘森林碳汇与生物多样性保护协同的前提条件,充分评估当地保护生物多样性的必要性和可行性,探索适用于当地生物多样性保护的林业行为,实现森林碳汇与生物多样性保护协同增效。

**参考文献(References):**


[1] Lindenmayer D B, Hulvey K B, Hobbs R J, Colyvan M, Felton A, Possingham H, Steffen W, Wilson K, Youngentob K, Gibbons P. Avoiding bio-perversity from carbon sequestration solutions. Conservation Letters, 2012, 5(1): 28-36.

[2] Soto-Navarro C, Ravilious C, Arnell A, de Lamo X, Harfoot M, Hill S L, Wearn O R, Santoro M, Bouvet A, Mermoz S, Le Toan T, Xia J, Liu S, Yuan W, Spawn S A, Gibbs H K, Ferrier S, Harwood T, Alkemade R, Schipper A M, Schmidt-Traub G, Strassburg B, Miles L, Burgess N D, Kapos V. Mapping co-benefits for carbon storage and biodiversity to inform conservation policy and action. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2020, 375(1794): 20190128.

[3] Ruijs A, Wossink A, Kortelainen M, Alkemade R, Schulp C J E. Trade-off analysis of ecosystem services in eastern Europe. Ecosystem Services, 2013, 4: 82-94.

[4] 谢花林, 李致远. 自然资源领域生态产品价值实现的多主体协同机制与路径. 自然资源学报, 2023, 38(12): 2933-2949.

[5] 齐麟, 张月, 许东, 朱琪, 周旺明, 周莉, 王庆伟, 于大炮. 东北森林屏障带生态系统服务权衡与协同关系. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3401-3411.

[6] 徐建英, 刘新新, 冯琳, 桓玉婷. 生态补偿权衡关系研究进展. 生态学报, 2015, 35(20): 6901-6907.

[7] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 高江波. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. 地球科学进展, 2015, 30(11): 1250-1259.

[8] 欧朝蓉, 孙永玉, 邓志华, 冯德枫. 森林生态系统服务权衡: 认知、方法和驱动. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 150-160.

[9] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展. 生态学报, 2012, 32(16): 5219-5229.
[10] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 黄海波. 西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同. 地理学报, 2022, 77(1): 182-195.
[11] 郑石明, 何裕捷, 邹克. 气候政策协同: 机制与效应. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(8): 1-12.
[12] Kangas J, Ollikainen M. A PES scheme promoting forest biodiversity and carbon sequestration. Forest Policy and Economics, 2022, 136: 102692.
[13] Di Sacco A, Hardwick K A, Blakesley D, Brancalion P H S, Breman E, Cecilio Rebola L, Chomba S, Dixon K, Elliott S, Ruyonga G, Shaw K, Smith P, Smith R J, Antonelli A. Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits. Global Change Biology, 2021, 27(7): 1328-1348.
[14] 吕植. 中国森林碳汇实践与低碳发展. 北京: 北京大学出版社, 2014: 146-177.
[15] 李怒云, 龚亚珍, 章升东. 林业碳汇项目的三重功能分析. 世界林业研究, 2006, 19(3): 1-5.
[16] 许骞骞, 曹先磊, 孙婷, 朱颖, 吴伟光. 中国森林碳汇潜力与增汇成本评估——基于 Meta 分析方法. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3217-3233.
[17] 吴伟光, 刘强, 朱臻. 考虑碳汇收益情境下毛竹林与杉木林经营的经济学分析. 中国农村经济, 2014(9): 57-70.
[18] 龙飞, 沈月琴, 祁慧博, 刘梅娟. 基于企业减排需求的森林碳汇定价机制. 林业科学, 2020, 56(2): 164-173.
[19] 杜之利, 苏彤, 葛佳敏, 王霞. 碳中和背景下的森林碳汇及其空间溢出效应. 经济研究, 2021, 56(12): 187-202.
[20] Chen D M, Zhang C L, Wu J P, Zhou L X, Lin Y B, Fu S L. Subtropical plantations are large carbon sinks: Evidence from two monoculture plantations in South China. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(9): 1214-1225.
[21] 方升佐, 田野. 人工林生态系统生物多样性与生产力的关系. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(4): 1-6.
[22] Sarira T V, Zeng Y W, Neugarten R, Chaplin-Kramer R, Koh L P. Co-benefits of forest carbon projects in Southeast Asia. Nature Sustainability, 2022, 5: 393-396.
[23] 陈熹, 刘滨, 周剑. 国际气候变化法中 REDD 机制的发展——兼对《巴黎协定》第 5 条解析. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2017, 16(1): 31-36.
[24] Panfil S N, Harvey C A. REDD+ and biodiversity conservation: a review of the biodiversity goals, monitoring methods, and impacts of 80 REDD+ projects. Conservation Letters, 2016, 9(2): 143-150.
[25] 王群, 范俊荣. 森林碳汇机制下保护生物多样性的规制问题探讨. 林业科学, 2013, 49(9): 148-152.
[26] Veldman J W, Overbeck G E, Negreiros D, Mahy G, Le Stradic S, Fernandes G W, Durigan G, Buisson E, Putz F E, Bond W J. Where tree planting and forest expansion are bad for biodiversity and ecosystem services. BioScience, 2015, 65(10): 1011-1018.
[27] 刘海燕, 郑爽, 孙艺珊, 邢聪聪, 于胜民. 生态系统碳汇纳入全国温室气体自愿减排机制供需分析及管理建议. 环境保护, 2024, 52(6): 38-42.
[28] Deal R L, Cochran B, LaRocco G. Bundling of ecosystem services to increase forestland value and enhance sustainable forest management. Forest Policy and Economics, 2012, 17: 69-76.
[29] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, Dalgaard T, Svenning J C. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 89-104.
[30] Palomo I, Dujardin Y, Midler E, Robin M, Sanz M J, Pascual U. Modeling trade-offs across carbon sequestration, biodiversity conservation, and equity in the distribution of global REDD+ funds. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(45): 22645-22650.
[31] Eken G, Bennun L, Brooks T M, Darwall W, Fishpool L D C, Foster M, Knox D, Langhammer P, Matiku P, Radford E, Salaman P, Sechrest W, Smith M L, Spector S, Tordoff A. Key biodiversity areas as site conservation targets. BioScience, 2004, 54(12): 1110.
[32] Salete Capellesso E, Cequinel A, Marques R, Luisa Sausen T, Bayer C, Marques M C M. Co-benefits in biodiversity conservation and carbon stock during forest regeneration in a preserved tropical landscape. Forest Ecology and Management, 2021, 492: 119222.
[33] 范铭超. 鱼与熊掌, 可得兼乎——气候变化国际法制下森林碳汇与生物多样性的矛盾与协调. 前沿, 2010(1): 91-97.
[34] Deere N J, Guillera-Arroita G, Baking E L, Bernard H, Pfeifer M, Reynolds G, Wearn O R, Davies Z G, Struebig M J. High Carbon Stock forests provide co-benefits for tropical biodiversity. Journal of Applied Ecology, 2018, 55(2): 997-1008.
[35] Sabatini F M, de Andrade R B, Paillet Y, Ódor P, Bouget C, Campagnaro T, Gosselin F, Janssen P, Mattioli W, Nascimbene J, Sitzia T, Kuemmerle T, Burrascano S. Trade-offs between carbon stocks and biodiversity in European temperate forests. Global Change Biology, 2019, 25(2): 536-548.
[36] Reside A E, VanDerWal J, Moran C. Trade-offs in carbon storage and biodiversity conservation under climate change reveal risk to endemic species. Biological Conservation, 2017, 207: 9-16.
[37] Strassburg B B N, Kelly A, Balmford A, Davies R G, Gibbs H K, Lovett A, Miles L, Orme C D L, Price J, Turner R K, Rodrigues A S L. Global congruence of carbon storage and biodiversity in terrestrial ecosystems. Conservation Letters, 2010, 3(2): 98-105.
[38] Gardner T A, Burgess N D, Aguilar-Amuchastegui N, Barlow J, Berenguer E, Clements T, Danielsen F, Ferreira J, Foden W, Kapos V, Khan S M, Lees A C, Parry L, Roman-Cuesta R M, Schmitt C B, Strange N, Theilade I, Vieira I C G. A framework for integrating biodiversity concerns into national REDD+ programmes. Biological Conservation, 2012, 154: 61-71.
[39] Huettner M. Risks and opportunities of REDD+ implementation for environmental integrity and socio-economic compatibility. Environmental Science & Policy, 2012, 15(1): 4-12.
[40] Pistorius T, Reinecke S. The interim REDD+ Partnership: Boost for biodiversity safeguards? Forest Policy and Economics, 2013, 36: 80-86.
[41] 陈英. 林业碳汇与生物多样性保护的法律研究. 重庆大学学报: 社会科学版, 2012, 18(3): 94-100.

[42] Lee D H, Kim D H, Kim S I. Characteristics of forest carbon credit transactions in the voluntary carbon market. Climate Policy, 2018, 18(2): 235-245.

[43] He J, Wang J P. Certificated exclusion: forest carbon sequestration project in Southwest China. The Journal of Peasant Studies, 2023, 50(6): 2165-2186.

[44] Ma M H, Haapanen T, Singh R B, Hietala R. Integrating ecological restoration into CDM forestry projects. Environmental Science & Policy, 2014, 38: 143-153.

[45] Barlow J, Lennox G D, Ferreira J, Berenguer E, Lees A C, Mac Nally R, Thomson J R, de Barros Ferraz S F, Louzada J, Oliveira V H F, Parry L, de Castro Solar R R, Vieira I C G, Aragão L E O C, Begotti R A, Braga R F, Cardoso T M, de Oliveira R C Jr, Souza C M Jr, Moura N G, Nunes S S, Siqueira J V, Pardini R, Silveira J M, Vaz-de-Mello F Z, Veiga R C S, Venturieri A, Gardner T A. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. Nature, 2016, 535(7610): 144-147.

[46] Grainger A, Boucher D H, Frumhoff P C, Laurance W F, Lovejoy T, McNeely J, Niekisch M, Raven P, Sodhi N S, Venter O, Pimm S L. Biodiversity and REDD at Copenhagen. Current Biology, 2009, 19(21): R974-R976.

[47] 白列湖. 协同论与管理协同理论. 甘肃社会科学, 2007(5): 228-230.

[48] 郭文月. 基于森林碳汇视角的生物多样性对森林生产力的传导机制研究. 中国林业经济, 2019(1): 61-66.

[49] Liu X J, Trogisch S, He J S, Niklaus P A, Bruelheide H, Tang Z Y, Erfmeier A, Scherer-Lorenzen M, Pietsch K A, Yang B, Kühn P, Scholten T, Huang Y Y, Wang C, Staab M, Leppert K N, Wirth C, Schmid B, Ma K P. Tree species richness increases ecosystem carbon storage in subtropical forests. Proceedings Biological Sciences, 2018, 285(1885): 20181240.

[50] Williams L J, Paquette A, Cavender-Bares J, Messier C, Reich P B. Spatial complementarity in tree crowns explains overyielding in species mixtures. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1(4): 63.

[51] Musavi T, Migliavacca M, Reichstein M, Kattge J, Wirth C, Andrew Black T, Janssens I, Knohl A, Loustau D, Roupsard O, Varlagin A, Rambal S, Cescatti A, Gianelle D, Kondo H, Tamrakar R, Mahecha M D. Stand age and species richness dampen interannual variation of ecosystem-level photosynthetic capacity. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1(2): 48.

[52] Sakschewski B, von Bloh W, Boit A, Poorter L, Peña-Claros M, Heinke J, Joshi J, Thonicke K. Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1032-1036.

[53] Danielsen F, Beukema H, Burgess N D, Parish F, Brühl C A, Donald P F, Murdiyarso D, Phalan B, Reijnders L, Struebig M, Fitzherbert E B. Biofuel plantations on forested lands: double jeopardy for biodiversity and climate. Conservation Biology, 2009, 23(2): 348-358.

[54] Kanowski J, Catterall C P. Carbon stocks in above-ground biomass of monoculture plantations, mixed species plantations and environmental restoration plantings in north-east Australia. Ecological Management & Restoration, 2010, 11(2): 119-126.

[55] Ewel J J, Mazzarino M J, Berish C W. Tropical soil fertility changes under monocultures and successional communities of different structure. Ecological Applications, 1991, 1(3): 289-302.

[56] Kurz W A, Dymond C C, Stinson G, Rampley G J, Neilson E T, Carroll A L, Ebata T, Safranyik L. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. Nature, 2008, 452(7190): 987-990.

[57] 李春义, 马履一, 徐昕. 抚育间伐对森林生物多样性影响研究进展. 世界林业研究, 2006, 19(6): 27-32.

[58] Phelps J, Webb E L, Adams W M. Biodiversity co-benefits of policies to reduce forest-carbon emissions. Nature Climate Change, 2012, 2: 497-503.

[59] Ruiz-Benito P, Gómez-Aparicio L, Paquette A, Messier C, Kattge J, Zavala M A. Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(3): 311-322.

[60] 於琍, 朴世龙. IPCC 第五次评估报告对碳循环及其他生物地球化学循环的最新认识. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 33-36.

[61] 李海东, 高吉喜. 生物多样性保护适应气候变化的管理策略. 生态学报, 2020, 40(11): 3844-3850.

[62] 吴建国, 周巧富, 李艳. 中国生物多样性保护适应气候变化的对策. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(S1): 435-439.

[63] Chen S P, Wang W T, Xu W T, Wang Y, Wan H W, Chen D M, Tang Z Y, Tang X L, Zhou G Y, Xie Z Q, Zhou D W, Shangguan Z P, Huang J H, He J S, Wang Y F, Sheng J D, Tang L S, Li X R, Dong M, Wu Y, Wang Q F, Wang Z H, Wu J G, Stuart Chapin F 3rd, Bai Y F. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4027-4032.

[64] 张伟伟, 高锦杰. 碳汇林供给的经济条件分析——兼论政府在碳汇交易机制中的作用. 东北师大学报: 哲学社会科学版, 2019(3): 177-183.

[65] 王毅, 张蒙, 李海东, 赵立君, 田春秀. 推进应对气候变化与保护生物多样性协同治理. 环境与可持续发展, 2021, 46(6): 19-25.

[66] Andres S E, Standish R J, Lieurance P E, Mills C H, Harper R J, Butler D W, Adams V M, Lehmann C, Tetu S G, Cuneo P, Offord C A, Gallagher R V. Defining biodiverse reforestation: Why it matters for climate change mitigation and biodiversity. Plants, People, Planet, 2023, 5(1): 27-38.

[67] Standish R J, Prober S M. Potential benefits of biodiversity to Australian vegetation projects registered with the Emissions Reduction Fund—is there a carbon-biodiversity trade-off? Ecological Management & Restoration, 2020, 21(3): 165-172.

[68] 陈悦. 应对气候变化与生物多样性保护的协同规制: 以生态系统服务为路径. 中国政法大学学报, 2022(4): 5-20.