

安徽林业碳汇现状·问题与对策研究

邱辉¹, 王晶晶^{2*}

(1. 安徽省林学会, 安徽合肥 230001; 2. 安徽省林业科学研究院, 安徽合肥 230031)

摘要 利用全国森林资源清查大数据和现有政策结合, 综合分析了安徽省森林植被碳储量及增汇固碳的潜力。分析表明, 安徽省林业中幼龄林占比较高, 碳密度低于全国平均水平, 具有很大的提高增汇能力的潜力。针对全省森林资源现状, 结合国内外林业碳汇相关政策, 探讨了林业碳汇面临的机遇、挑战和对策建议, 为安徽林业碳汇的进一步发展提供了理论参考和实践指导。

关键词 气候变化; 林业碳汇; 资源清查; 固碳潜力; 对策建议

中图分类号 F326.2 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)11-0076-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.11.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Present Situation, Potential and Countermeasures of Forest Carbon Sequestration in Anhui Province

QIU Hui¹, WANG Jing-jing² (1. Anhui Society of Forestry, Hefei, Anhui 230001; 2. Anhui Academy of Forestry, Hefei, Anhui 230031)

Abstract This paper comprehensively analyzed the carbon storage and carbon sequestration potential of forest vegetation in Anhui Province by using the big data of national forest resource inventory and existing policies for the first time. The proportion of young and middle-aged forests in forestry in Anhui Province is relatively high, and the carbon density is lower than the national average level, which has great potential to improve the capacity of increasing sinks. According to the current situation of forest resources in Anhui Province, combined with the relevant policies of forestry carbon sinks at home and abroad, the opportunities, challenges and countermeasures of forestry carbon sinks were discussed for the first time, providing the corresponding theoretical reference and practical guidance for the further development of forestry carbon sinks in Anhui Province.

Key words Climate change; Forestry carbon sink; Resource inventory; Carbon sequestration potential; Countermeasures and suggestions

温室气体排放的主要来源是交通、建筑、工业及森林减少四大领域, 全球毁林 CO₂ 的排放量位居工业及建筑业之后, 是全球第三大温室气体排放源。气候变化不仅是全球环境问题, 也是国际关注的社会问题^[1]。我国作为全球负责任的大国, 一直重视对气候变化影响与适应对策的研究, 敢于直面严峻的碳减排压力, 于 2020 年提出了“3060 碳达峰碳中和”的宏伟目标。林业兼具适应气候变化、舒缓自然灾害以及促进可持续发展方面的三重功能, 森林作为陆地生态系统的主体, 具有有效的生物固碳能力, 与工业减排相比, 森林固碳成本低, 简单易行, 综合效益大。利用林业碳汇抵减工业碳排放, 已成为国内外碳交易机制的一项重要内容。长期以来, 我国坚持把发展林业作为应对气候变化的有效手段, 通过推进大规模造林绿化、加强森林经营和保护自然资源等措施增加森林碳汇, 目前已展示出实际成效。

1 应对气候变化的国内外政策背景

1.1 国际上应对气候变化的背景 为了减缓由温室气体浓度增加导致的全球变暖, 过去 30 年间国际社会作出了巨大努力, 先后制定了多个具有法律约束效力的国际公约^[2]。1992 年签订了《联合国气候变化框架公约》, 确立应对气候变化的最终目标和国际合作应对气候变化的基本原则, 是应对气候变化的第一个里程碑文件。1997 年签订了《京都议定书》, 人类历史上首次以法规的形式限制温室气体排放, 是第

一个限制温室气体排放的全球性制度安排。2015 年签订了《巴黎协定》, 第一次绝大部分国家作出了有关目标、减缓、适应、损失损害、资金、技术、能力建设、透明度、全球盘点等方面的承诺, 是人类历史上应对气候变化的第三个里程碑式的国际法律文本, 形成了 2020 年后的全球气候治理格局。

1.2 国内应对气候变化的背景 我国是最大的温室气体排放国之一, 也正处于实现工业化和现代化过程中, 如何平衡、协调经济高速发展与碳排放之间的矛盾, 寻找出工业减排的低成本绿色替代途径, 是我国在探索可持续发展道路上必须回答好的重大课题。2020 年 9 月, 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布我国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 提出了“双碳”目标^[3], 在此后的多个重大国际国内场合反复重申, 强调坚决落实。2022 年 10 月 16 日, 在二十大报告会上, 习近平主席再次强调了积极稳妥推进碳达峰碳中和, 有计划分步骤地实施碳达峰行动。

1.3 林草系统“双碳”政策背景 林草系统是碳达峰碳中和“1+N”政策体系之一, 2021 年国务院中共中央、国务院发布《关于完整准确贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中, 强调了需要从巩固生态系统碳汇能力和提升生态系统碳汇增量两个方向, 持续巩固提升碳汇能力, 印发的《关于 2030 年前碳达峰行动方案》碳达峰十大行动中, 部署了碳汇能力巩固提升行动, 即巩固生态系统固碳作用, 提升生态系统碳汇能力, 加强生态系统碳汇基础支撑。2022 年安徽省委、省政府印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》中, 林草涉及巩固生态系统碳汇能力, 提升生态系统碳汇增量及提升统计监测能力 3 项重点任务。

基金项目 国家重点研发计划项目(2022YFF1303002); 安徽省重点研究与开发计划项目(2022107020001); 2022 年安徽省林业科技创新项目“森林碳汇计量技术研究”。

作者简介 邱辉(1961—), 男, 安徽桐城人, 高级工程师, 博士, 从事林业行政管理、林业发展政策研究。* 通信作者, 助理研究员, 博士, 从事森林生态系统碳循环和林业碳汇研究。

收稿日期 2022-11-07

2 国内林业碳汇项目现状

2.1 清洁发展机制和自愿核证减排机制 为应对全球气候变化,促进世界各国积极实施减少温室气体排放,《京都议定书》规定了3种机制:排放贸易(ET)、联合履约(JI)、清洁发展机制(CDM)^[4]。其中,CDM是唯一与发展中国家相关的机制。但林业碳汇项目在CDM项目中占比很低,现在国内已不再开发CDM项目。我国从2005年加入国际CDM项目起,经历曲折的发展过程,近些年借鉴CDM机制逐步搭建适用于我国国情的自愿核证减排机制(CCER),并着手建立碳排放交易试点市场(ETS)+自愿核证减排机制(CCER)碳交易市场体系。在北京、上海、天津、重庆、湖北、广东、深圳、福建、四川等省市开展碳排放权交易试点。

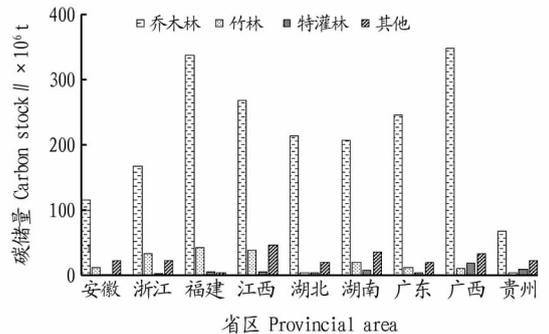
2.2 国内林业碳汇碳市场 全国碳市场包括一个强制的市场和一个自愿的市场,国家层面可开发林业碳汇项目的自愿核证减排CCER,是基于项目抵减的自愿市场。地方层面呈现出多种自愿交易形式并存的格局,比较有特色的有广东的碳普惠、福建三明的碳票、福建的一元碳汇、贵州的单株碳汇等。

3 安徽省森林碳储量及碳汇潜力

3.1 安徽省林业概况 安徽地处暖温带与亚热带过渡地区,是我国东南低山丘陵林区重点省份,具有得天独厚的林业发展条件,主要造林树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、杨树(*Populus* spp.)、栎类(*Quercus* spp.)等。第九次全国森林资源清查结果显示,安徽省森林面积395.85万 hm^2 ,森林覆盖率28.65%,森林蓄积量超过2.2亿 m^3 ,森林植被总生物量3.13亿 t ^[5]。安徽省是长江、淮河的水资源安全及生物多样性保护生态屏障,也是我国重要的碳汇能力提升区域。新发展阶段,安徽全域纳入长三角区域一体化国家发展战略,同时安徽林业发展也进入转型升级关键期,注重提高森林、湿地生态系统的质量和稳定性,全面提升优质生态产品生产能力^[6]。

3.2 安徽省森林碳储量特征 安徽地处我国东南低山林区,是我国发展速生丰产用材林和经济林基地潜力最大的地区。据第九次全国森林资源清查数据,全省森林植被碳储量为 $153.61 \times 10^6 \text{ t}$,其中乔木林碳储量 $115.70 \times 10^6 \text{ t}$,竹林碳储量 $13.00 \times 10^6 \text{ t}$,特灌林碳储量 $2.26 \times 10^6 \text{ t}$,其他碳储量为 $22.65 \times 10^6 \text{ t}$ (图1)。按林木所有权分,安徽省森林资源以个人所有为主,占全省森林面积的80.83%。按林种分,以用材林最多,占全省森林面积的53.35%。用材林以培育和提供木材或竹材为主要目的的森林^[7],但木质林产品制造企业,碳排放水平较高,承担减排任务是大势所趋,在碳排放与交易机制下,营林主体和制造企业间在进行木材交易的同时,可以进行林业碳汇交易。按起源分,安徽省森林人工林居多,占比58.84%。而天然林的碳储量和固碳能力普遍高于人工林,天然林受人为干扰较少,林分结构比较合理,碳密度相对较高,进而会影响森林植被总碳储量的存储。按照龄组分,中幼龄林占森林面积的66.65%,森林碳储量与其林龄结构密切相关,森林碳动态在很大程度上取决于其龄级的变

化^[8],中幼龄林的总碳密度一般低于近熟林、成熟林和过熟林。乔木林优势树种中杉木林、杨树林和马尾松面积及蓄积量最高,分别占乔木面积的13.90%、11.46%和11.35%^[5]。安徽省乔木蓄积量高达 $71.88 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,在东南低山丘陵林区所有省份中位居第2,该数据表明,近年来安徽省对林业各项改革,提高森林的经营管理及抚育水平有正向促进的成效,在有限的林地内提高了林分质量和森林生产力。



注:其他包括一般灌木林、疏林、散生林(竹)和四旁树的碳储量。

Note: Other carbon storage includes the carbon storage of general shrubs, open forests, scattered forests.

图1 东南低山丘陵林区各省碳储量

Fig. 1 Carbon storage of each province in the southeast low mountain and hilly forest area (bamboo) and surrounding trees

3.3 安徽省植被碳储量动态及固碳潜力 纵观林业碳汇能力动态发展,前期低缓、中期加快、后期获得恢复性增长。乔木林、竹林固碳占比大,而人工林质量高、中幼龄林比重大,全省森林植被碳汇增长空间潜力巨大。近年来,国内积累了少量研究,为揭示安徽省森林植被的固碳现状及提高森林碳汇功能提供了基础数据。有学者利用第4~6次森林资源清查数据估算了全国各省森林植被的固碳量。调查期内(1979—1994年)安徽的森林固碳量有所增长,但趋势非常缓慢^[8],可能是由于经济社会发展加速和城市化建设加快,对林地林木的需求量大。2000年后安徽省森林植被碳汇增长显著,直接原因是:一方面实施退耕还林、绿色长廊等造林绿化工程,快速有效增加森林面积;另一方面,加大林地、森林保护力度,实施公益林生态补偿,森林生态系统得到恢复性增长。有研究通过前几期的森林资源清查数据,利用生物量模型、BI-OME4系列模型等方法,对安徽省的碳储量、碳密度及碳汇潜力进行了评估,显示安徽省森林植被碳储量为 $116.3 \times 10^6 \text{ t}$,一致认为安徽省大部分林分都较为年轻,碳密度低于全国水平,尚有较大增汇潜力^[9-11]。与第九次清查数据相比,安徽省森林植被碳储量明显增长,再次证明近年来安徽实施的林业工程项目成效显著。

4 安徽省林业碳汇存在的困难和问题

4.1 林业碳汇交易体系不完善 目前,国家层面可开发林业碳汇项目的CCER,是基于项目抵减的自愿市场,其配套的政策、法律、交易制度和监督管理条件均不成熟,CCER备案2017年暂停后,至今尚未启动,客观因素导致难以进一步推

进 CCER 项目的开发和交易。

4.2 林业碳汇基础技术力量薄弱 开展林业碳汇项目开发和交易,必须选取契合项目开发条件的法学体系,现有备案的方法学难以适应林业碳汇项目开发的需要,其程序复杂、门槛高,相关的技术规范少。此外,致力于林业碳汇基础研究的生态学者较少,研究基础薄弱,成果有限,尤其针对现有森林采取经营措施,实现增碳效果的途径方法缺乏创新。

4.3 林业碳汇交易成本较高 开发林业碳汇项目的总成本主要包括一次性成本和持续性成本^[12]。控排企业使用包括林业碳汇在内的 CCER 项目,抵消企业温室气体排放量的份额被限制为最高不超过 5%。林业碳汇项目减排量在碳交易市场中的占比很小。通常开发一个林业碳汇项目的总费用高达 50 万~100 万元(333.333~666.667 hm²),需历时 1~2 年,因此,开发林业碳汇项目(CCER 项目)程序复杂、周期长、成本高^[13],导致开发成本和收益不匹配,企业参与度低。

4.4 林业碳汇市场交易缺乏活力 林业碳汇项目减排量以自愿减排市场交易为主,目前,我国主要依靠政府推动,市场化程度较低。林业碳汇依托项目,而我国林业碳汇项目的开发者主要是地方林业管理部门,企业的参与程度偏低,在林业碳汇市场交易缺乏活力的情况下,减排企业更倾向于参与其他碳汇项目或者购买碳配、碳信用,致使林业碳汇项目市场供需不平衡。

4.5 林业碳汇计量监测体系不健全 目前安徽省内林业碳汇计量监测工作尚未展开,用于林草碳储量、碳汇量等测算数据源于 2012—2014 年森林资源规划设计调查成果的年度更新,缺少后期实测修正,目前难以精准测算及反映全省各层次林草碳汇能力的真实状况,也难以对全省林草资源碳汇潜力作出科学客观分析。

4.6 林业碳汇项目开发财政支持缺位 随着我国社会经济的不断发展,林业建设得到了政府的重视,政府出台了大量林业优惠政策,尤其以生态文明和生态体系建设为重,但就林业碳汇建设和项目开发而言,国家金融财税政策关注度尚不够高,全国碳汇金融仍处于探索建设之中。此外,林业碳汇项目开发程序复杂、周期长、成本高,制约因素多,成功率偏低,企业参与的积极性不高。目前,国家财政和地方政府是生态补偿资金的主要来源,而自筹资金、贷款等正处于试点阶段,缺少市场化、规范性操作,可补偿的范围较窄^[14]。安徽省林业碳汇工作尚处于起步阶段,能否建成完善的管理体系、数据体系、分析评估体系和项目开发及交易体系,财政资金支持是关键。

5 关于安徽省林业碳汇发展的思考与建议

安徽省开发林业碳汇项目的潜力很大,目前鲜见有针对安徽林业碳汇开发现状、问题及对策的相关研究。由于我国各区域的森林资源分布差异较大,经济社会发展阶段不尽一致,为此,笔者结合安徽林情特征对林业碳汇的发展提出对策。

5.1 为林业碳汇项目开发作充分准备 林业碳汇项目是林业“三重功能”最好的诠释(图 2),积极发展林业碳汇项目,

是全面落实安徽省深化林业各项改革抓手之一,也是促进资源型经济转型及推进乡村振兴战略实施的重大举措。目前,国家发改委将林业造林和经营减排项目纳入温室气体自愿减排交易机制。下一步将在推动建立国家碳排放权交易市场的基础上,在全国碳市场抵消机制的设计中考虑对林业碳汇项目的倾向性、支持性政策。

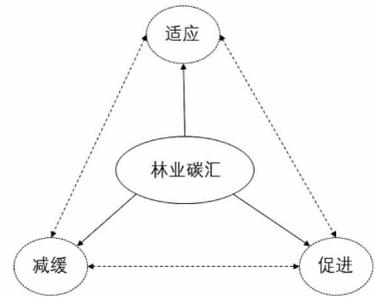


图 2 林业碳汇项目“三重功能”

Fig. 2 “Three functions” of forestry carbon sink project

开发林业碳汇项目需综合考虑几个前提:一是碳汇项目的类型是造林(再造林)增汇还是森林经营增汇,由谁来认定批准,并作为进入碳汇市场法定依据;二是项目实施主体所遵循的造林或经营的技术准则有哪些,目前已经备案林业碳汇项目方法学是否适用于安徽省;三是所形成的林业碳汇产品如何进入市场,碳汇定价以及可预测的交易收益等。建议尽快摸清安徽省的资源家底,研究适合安徽省林业碳汇项目发展的路径,制定加快林业碳汇项目建设实施方案,出台林业碳汇项目经营技术导则,探索制定林业碳汇项目管理办法,建立林业碳汇项目信息及时发布和互相交流便捷渠道。

5.2 激活林业碳汇交易市场 目前,我国森林生态服务价值实现的主要方式是政府补偿^[15],但仅仅依靠政府建设生态公益林来提供补偿显现出许多弊端,如补偿标准偏低,个人和私有部门参与度不高,长期补偿导致政府财政负担过重以及补偿资金用途不明确或使用效率低下等问题。在经济条件下,解决现行森林生态服务供需不平衡的关键途径,通过价格驱动市场,充分发挥市场在资源分配上的作用,调节供需关系。

建议借鉴相关经验,深入开展林业碳汇研究,探索制定林业碳汇项目开发交易政策^[16],选择林业改革综合试点市先行实施林业碳汇项目和尝试碳汇产品交易。鼓励省内重点排放企业合作开发林业碳汇项目,多种方式参与林业碳汇合作开发和市场交易。推进生态产品市场交易体系建设,探索建立林业碳汇以“期货交易为主,项目合作为辅”的森林碳汇交易市场体系,能够有效规避风险和成本,有助于形成公正公开的价格,顺应国内森林碳汇交易发展趋势。鼓励各种市场主体依法依规通过转包、租赁、转让、入股、合作等形式参与林业碳汇项目开发,积极参与国家碳汇市场交易。

5.3 加强碳汇绿色金融服务 建议引导各地建立多元化资金投入机制,尝试设立林业碳汇发展基金,支持林业碳汇项目开发。探索拓展企业生态债券和社会捐助等林业碳汇资

金渠道,合力推进绿色碳金融发展,探索“碳汇期权抵押+项目贷”模式,支持安徽省林业企业开发林业碳汇项目。在成熟的森林保险制度的基础上,大胆尝试林业碳汇保险,林业碳汇具有生长周期性、环境复杂性等特点,经受的自然灾害会严重影响碳汇项目的执行,通过保险的方式把自然风险规避到投资方承担,设计出完善的相关保险体系,规避林业碳汇市场的各种风险尤为重要。

5.4 强化森林可持续管理 安徽省森林植被平均碳密度 $12.02 \sim 20.70 \text{ t/hm}^2$,远低于全国平均碳密度水平 $41 \sim 43 \text{ t/hm}^2$ ^[17]。主要原因是近些年来安徽省实施的一系列造林工程,幼龄林、中龄林较多,人工林在减缓全球气候变化有着举足轻重的作用,安徽省人工林占比较高,因此,需要科学地进行森林经营活动,可以有效提高了人工林的碳密度,进而促进森林碳汇的增长。

建议加强中幼林抚育管护,提高人工林林分质量,直接有效增加陆地植被和土壤碳储量。实施平安森林行动和健康森林行动,加强森林火灾防控和森林病虫害防治,提升管护能力,全面建立基层护林体系,全面有效地保存现有森林生态系统中储存的碳,减少其向大气中的排放量。因各树种生长、死亡、腐烂过程中对气候的依赖程度不同,受碳驱动的特性也存在明显差异,各树种的固碳效率也不同,建议实施林业碳汇项目时,优先选择具有固碳优势的树种。

5.5 重视林业碳汇科技 实施碳汇森林行动与常规的营造林工程要求有很大不同,需加深对应气候变化相关全球治理制度与政策、林业碳汇基本知识、国内外碳交易等,切实增强森林固碳增汇能力。要开展林业碳汇调查评估和计量监测,急需培养林业碳汇专业型人才队伍,组建林业碳汇项目专家团队,为林业碳汇项目建设和碳汇产品交易提供技术指导和政策咨询,对项目的实施过程进行权威监测评价和评估总结,为规范林业碳汇项目运行、管理程序、建立健全技术标准提供专业技术服务。

建议加快林业碳汇,推进机制体制建设,只有建立了林业碳汇理论体系、技术标准体系、咨询服务体系和行政管理体系以及法制保障制度,才能为林业碳汇市场的繁荣作好基础准备,促使全社会参与林业碳汇开发,促使第三方服务机构活跃起来,对促进碳资产和碳汇项目管理规范化、标准化和长期化具有重要作用,对促进乡村振兴和林区绿色经济发展具有重要意义。

5.6 加大林草碳汇功能宣传和培训力度 建议开展造林绿化与林业碳汇、气候变化与碳中和专题培训和研讨,提升林业相关从业人员理论素养和专业技术水平,针对省级和市区县级林业管理者、技术支撑单位、项目开发业主,组织专家开展不同类型的林业碳汇专题培训,纠正各阶层群众的认识误

区。拓展媒体手段,将碳中和、碳汇交易相关知识通过学科教育和互联网平台普及给大众,进一步宣传新时期生态文明理念,加大林业碳汇知识和政策的宣传普及力度,加深人民群众对碳达峰、碳中和以及碳汇交易的认识。积极参加造林增汇活动,提高自觉消除碳足迹,培养企业社会责任感和公民环境意识,帮助广大公众进一步树立绿色生态理念和低碳生活理念。

5.7 加速推进计量监测体系建设 建立省级林业碳汇计量监测体系,是应对气候变化中重要的基础性、支撑性工作。为构建林草湿碳计量模型体系,测算和评估林草碳储量和碳汇量及潜力,需率先提供假设构想和解决方案。安徽省要加大政府对林业碳汇计量监测的关注力度,从中央到地方政府转变思维认知,从政策、法律和资金等方面加大对林业碳汇的投入,构建林草碳计量模型体系,根据完善后的计量模型体系,算清林草碳储量和碳汇潜力,开展全省林草碳汇资源管理平台建设,实现构建林业碳库现状及动态数据库的目标,最终才能真正践行低碳经济,实现我国经济的可持续性发展。

参考文献

- [1] 范晓晖. 广西桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子研究[J]. 桉树科技, 2018, 35(2): 27-30.
- [2] 方精云. 碳中和的生态学透视[J]. 植物生态学报, 2021, 45(11): 1173-1176.
- [3] 韩枫, 彭华福, 唐肖彬, 等. 全球碳定价机制发展趋势、现状及对我国的启示[J]. 环境保护, 2021, 49(24): 66-70.
- [4] 孙晓波. 黑河市碳汇林业发展研究[J]. 林业勘查设计, 2019(2): 34-36.
- [5] 国家林业和草原局. 2014—2018 中国森林资源报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [6] 程中才. 坚持新思想引领 推进高质量发展 奋力开创新时代安徽林业现代化建设新局面[J]. 安徽林业科技, 2018, 44(1): 3-11.
- [7] 李祥. 抚育强度对兴安落叶松林生长及光合作用的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [8] 王会荣, 李爱琴, 王晶晶, 等. 基于第8次森林资源清查数据的安徽森林碳储量特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 78-86.
- [9] 李爱琴, 王会荣, 王晶晶, 等. 安徽省森林植被碳储量、碳密度动态及固碳潜力[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(5): 953-962.
- [10] 汲玉河, 郭柯, 倪健, 等. 安徽省森林碳储量现状及固碳潜力[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 395-404.
- [11] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 人工林经营与全球变化减缓[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3870-3877.
- [12] 陈周光, 龙飞, 祁慧博, 等. 中国林业碳汇交易现状、问题与对策[J]. 绿色财会, 2021(10): 3-7.
- [13] 高沁怡, 潘春霞, 刘强, 等. 基于贝叶斯网络的林业碳汇项目风险评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 210-218.
- [14] 何桂梅, 王鹏, 徐斌, 等. 国际林业碳汇交易变化分析及对我国的启示[J]. 世界林业研究, 2018, 31(5): 1-6.
- [15] 王文英. 森林生态服务市场的构建及其运行机制研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [16] 邹丽梅. 我国森林碳汇交易的瓶颈与法律对策[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(25): 337-340, 371.
- [17] 林玮, 白青松, 陈雪梅, 等. 华南主要造林树种碳汇能力评价体系构建及优良碳汇树种筛选[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(1): 28-37.