DOI: 10.5846/stxb202206291848
祁慧博,杜萌萌,龙飞,高晓玮.不同生态调控情景下人工林可持续经营收益研究.生态学报,2023,43(9):3607-3624.
Qi H B, Du M M, Long F, Gao X W.Research on sustainable management benefits of plantation under different ecological regulation scenarios. Acta Ecologica Sinica,2023,43(9):3607-3624.

不同生态调控情景下人工林可持续经营收益研究

祁慧博[1,2],杜萌萌[1],龙　飞[1,2,*],高晓玮[1,2]
1 浙江农林大学经济管理学院,杭州　311300
2 浙江省重点培育智库——浙江农林大学浙江省乡村振兴研究院,杭州　311300

摘要:在林业碳汇项目设计与作业标准基础上,将中国东北地区典型人工林生长与经营相关多源数据融合,运用系统动力学理论与方法,构建人工林生态经济系统模型,通过设计实施主伐/间伐、营造混交林、补植补造等不同生态调控情景,模拟并预测人工林可持续经营的生态—经济收益,以此掌握人工林生态调控机制,并为人工林可持续经营决策提供参考。模拟结果显示:①高初植密度能有效增汇,而低初植密度相比基准情景则减少了碳汇;②高主伐率使得木材收益大幅提升,而无主伐限制了木材收益,且从长期来看碳汇收益有限;③高密度-无主伐情景下的累计碳汇量最大,高密度-高主伐情景下的木材收益净现值和总收益净现值最大;若以可持续经营为目标,平衡生态收益和经济收益,则高密度-高主伐情景为理想选择,该情景的累计碳汇量相比高密度-无主伐情景损失有限,对应碳汇收益净现值为 357.9 万元,以 5%贴现率计算的木材总收益和累计总收益的净现值分别为 1219.35 万元和 1577.25 万元。由此证实了以林业碳汇项目为依托,因地制宜地构建将造林、抚育、采伐、再造林更新于一体的人工林可持续经营项目,平衡发挥森林生态系统的综合功能,可纾解因无法采伐所带来的高额机会成本,在增汇的同时获得更大的木材收益。适度提高造林密度或造林面积可以增汇,但碳汇收益还取决于碳定价;此外,合理采伐也是实现人工林可持续经营的方式之一,可持续经营收益的关键在于科学的生态调控机制;应向平衡生态与经济收益的目标转变,加快林业经营理念转变与相关法律体系制定。

关键词:人工林;生态调控;可持续经营收益

Research on sustainable management benefits of plantation under different ecological regulation scenarios

QI Huibo[1,2], DU Mengmeng[1], LONG Fei[1,2,*], GAO Xiaowei[1,2]
1 *College of Economics and Management, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou* 311300, *China*
2 *Zhejiang Province Key Cultivating Think Tank——Research Academy for Rural Revitalization of Zhejiang Province, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou* 311300, *China*

Abstract: Based on the design and operation standards of forestry carbon sequestration project, the multi-source data related to the growth and management of typical plantations in Northeast China are integrated, and the ecological and economic system model of plantations is constructed by using the theory and method of system dynamics. The ecological and economic benefits of sustainable management of plantations are simulated and predicted through the design and implementation of different ecological regulation scenarios such as main felling/thinning, creation of mixed forests, replanting to master the ecological regulation mechanism and provide reference for sustainable management decision of plantations. The simulation results show that: ① high initial planting density can effectively increase the carbon sequestration, while low initial planting density can reduce the carbon sequestration compared with the baseline scenario;

基金项目:国家自然科学基金项目(71803180);国家社会科学基金项目(22BGL168);教育部人文社科青年基金项目(18YJCZH140);浙江省软科学研究计划项目(2023C35077)
收稿日期:2022-06-29;　　**采用日期**:2022-11-29
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: longf2007@163.com

② High main cutting rate has greatly increased the timber benefits, while no main cutting has limited the timber benefits, and the carbon-sequestration benefits are limited in the long run; ③ The cumulative carbon sequestration of plantation is the largest under the scenario of high density and no main cutting, and the net present value of timber benefits and the net present value of total benefits of plantation are the largest under the scenario of high density and high main cutting. If we take sustainable management as the goal, balance ecological and economic benefits, and take the high density and high main cutting scenario as the optimal choice, the loss of the cumulative carbon sequestration is limited in this scenario compared with the high density and no main cutting scenario. The corresponding net present value of carbon-sequestration benefits is 3.579 million yuan, and the net present value of total timber benefits and cumulative total benefits at a discount rate of 5% are 12.1935 million yuan and 15.7725 million, respectively. It is confirmed that the sustainable management project of plantations integrating afforestation, tending, cutting, reforestation and regeneration based on the forestry carbon sequestration project can be built according to local conditions, and the comprehensive function of forest ecosystem can be balanced. It can relieve the high opportunity cost caused by the inability to cut, and obtain greater timber benefits while increasing carbon sequestration. Moderate increase of afforestation density or afforestation area can increase carbon sequestration, but the benefits of carbon sequestration also depend on carbon pricing. In addition, rational cutting is also one of the ways to achieve sustainable management of plantation; the key to sustainable management benefits lies in scientific ecological regulation mechanism. We should change to the goal of balancing ecological and economic benefits, accelerate the transformation of forestry management concept and the formulation of relevant legal system.

Key Words: plantation; ecological regulation; sustainable management benefits

人工林是陆地生态系统的重要组成部分,在提供林木产品、增加森林碳汇、改善生态环境等方面发挥着重要作用。根据中国第九次全国森林资源清查结果,2014—2018 年中国人工林面积达 8003.10 万 hm^2,占全国森林面积总量的 36.37%,居世界首位;人工林蓄积量 33.87 亿 m^3,比 2009—2013 年增长 36.42%。尽管中国人工林面积和蓄积量呈现较长时间的增长,但是其建设仍然存在林分结构单一、生物多样性低下、生态功能不强、经营管理粗放、经济效益不高等问题[1—4]。

提高人工林经营管理水平、增强人工林碳汇功能已成为全球公认的“减缓全球气候变化的重要机制”。树种丰富度与森林生产力和生物多样性呈正相关[5],因此森林经营过程中应考虑广泛的树种,林业政策也必须激励新价值链生成和新技术运用[6—7]。通过人工抚育、间伐等方式促进人工林天然更新和林下植被发育,也可以营造混交林来提高生态稳定性和林分生产力。此外,还有清理林下地被物、补植补造、加强管护和进行封育等其它辅助措施[8]。在很长一段时间内,学术界将采伐与破坏生态系统相挂钩,但是森林系统具有一定的自组织性,且在不断演化与自我更新,通过科学的生态调控所进行的森林可持续经营实则是权衡不同目标和利益的决策,应通过采伐管理来实现合理采伐和资源的永续利用[9]。森林对减缓气候变化的贡献还包括对木材的利用,一是避免化石能源的排放,二是与生产功能相同的材料相比可以消耗更少的能源,减少排放,成为实现碳补偿的有效方式之一。碳汇与木材产品之间并不存在绝对的正相关或者负相关关系,有研究表明高强度的采伐在获得更多木材产品的同时会导致森林碳储量降低[10];也有学者认为适度更新成、过熟林,有助于增加碳汇[11],此外,碳汇与木材的获取极易受到气候、自然灾害等诸多因素的影响,存在着较大的不确定性[12—13]。因此,有必要在不同生态调控情景下将木材采伐造成的碳储存损失与木材利用带来的替代效应相结合,进行人工林可持续经营评估[14],以上本文研究的核心问题不仅有助于提升人工林的综合收益,也在应对气候变化背景下给出了森林生态经济系统协调发展的创新型路径。

森林生态系统与经济系统相互联系又不可分割,在协作运行中实现整个系统动态发展[15—16]。子系统内部组成之间具有客观非线性特征,难以用传统方法来建立复杂系统模型,而更适用于生态经济系统模型来表达森林生态系统与经济系统之间的相互作用和反馈关系。国际学术界从 20 世纪 90 年代初就将生态经济、社会以及生物物理模型整合在可持续发展框架中,开发出不同的生态经济系统模型,对森林生态经济系统进行

预测、模拟和优化[17—19]。例如,Grasson 等采用动态优化和模拟方法构建出海岸红树林生态系统中森林和渔业生产之间关系的生态经济系统模型,研究对红树林资源利用的有效性[20];Li 等建立了景观评价模型,从生态和经济两个视角对木材生产与野生生物栖息地管理进行评价,模拟不同管理情景下的森林动态变化[21];Bach 基于最优控制理论构建了生态经济系统模型,以整合木材开采的生态效益与经济效益,评价有关木材开采的不同政策效应[22]。上述模型根据各自的结构特点可以分为两种形式:一种是建立生态要素与经济要素完全融合的单一模型,另一种是建立相互联系的各子模型组成的系统,主要有系统动力学、线性规划、行为论、热力学第二定律模拟等方法[23]。其中,系统动力学方法有助于建立森林生态系统与经济系统之间的因果关系网络,以整体观替代传统的元素观,它不是依据数学逻辑的推演,而是依据对系统的实际观测信息建立动态仿真模型,并通过计算机实验来获得对系统未来行为的描述,为人工林生态调控机制设计与可持续经营决策制定提供依据[24—25]。系统动力学方法在森林生态、林业经济发展等方面具有较好的适用性,在林木生长和森林蓄积量、碳储量等预测中已被广泛应用[26—27]。

现有研究为本文提供了理论基础与分析思路。本文采用系统动力学方法,通过设计实施主伐/间伐、营造混交林、补植补造等不同生态调控情景,模拟并预测微观地域在 60 年长周期内围绕人工林可持续经营目标所得出的生态—经济收益。

1　模型构建与数据来源

1.1　模型构建

本文构建的人工林生态经济系统模型是在 CCER(Chinese Certified Emission Reduction, 国家核证自愿减排量)林业碳汇项目基础上进行的可持续经营创新,以注重林业多功能性,兼顾生态效益(碳汇产品)与经济效益(木材产品)。结合气象、水文、地理、树种选择、空间配置及其他造林技术措施,同时考虑林木生长特性、生物多样性及林产品生命周期,建模过程中融合了多个 CCER 林业碳汇项目设计标准,形成一个典型的人工林生态经济系统,并设定项目一个周期的运行时长为 60 年。项目实施地在中国东北地区,具体的生态调控方式设计为:(1)第 1—20 年选择东北地区的常见树种落叶松开展造林活动;(2)第 21—30 年间实施抚育间伐,改善落叶松生长环境,促进初植落叶松生长;(3)第 31—40 年实施补植补造,树种为红松;(4)第 41—60 年,初植落叶松已达近熟林,每隔 2 年实施一次主伐,同时按与采伐率相等的造林率展开造林,树种为云杉。

模型基于系统动力学方法和理论,以基准情景为例,起始时间为第 0 年,终止时间为第 60 年,观测步长为 1,单位为年。模型中所涉及的变量、单位及变量间的逻辑函数关系如附表 1,构建系统动力学模型如图 1。通过设定和调整相关参数,模拟分析不同情景下系统内各要素的变化趋势及具体数值,具体为不同阶段项目碳汇量及碳汇收益、木材收益和总收益的变化,以此揭示人工林生态调控机制,比较不同机制下的可持续经营效益,为人工林经营管理及政策制定提供决策参考。

1.1.1　碳储量

人工林固碳能力受采伐频率和采伐后森林结构的影响[28]。参照 CCER 黑龙江省林口县碳汇造林项目设计文件,设定总造林面积为 666.67hm^2,造林活动于项目周期的前 5 年开展,年造林面积分别为 251.6hm^2、41hm^2、35.4hm^2、258.6hm^2、80.07hm^2,有文献将采伐率设定为相对更高的 3%[29],而为了实现最大化的生态效益,实际采取封山育林或以现行标准开发 CCER 林业碳汇项目等方式时的采伐率 0,据此将采伐率折中设定为 1.5%,采伐面积等于林地面积乘以采伐率。

三次造林中所种植的落叶松为 S1—2,红松苗龄为 S2—4,云杉苗龄为 S2—4。其中,S1—2 表示春季播种、1 年后移栽、再培育 2 年的 3 年生苗木,S2—4 表示春季播种、2 年后移栽、再培育 4 年的 6 年生苗木。不同树种的固碳能力有显著差异[30],生长曲线也不相同,其生长变化趋势及速度快慢影响森林碳储量的变化。结合 CCER 黑龙江翠峦森林经营碳汇项目设计文件,使用落叶松单株材积公式:

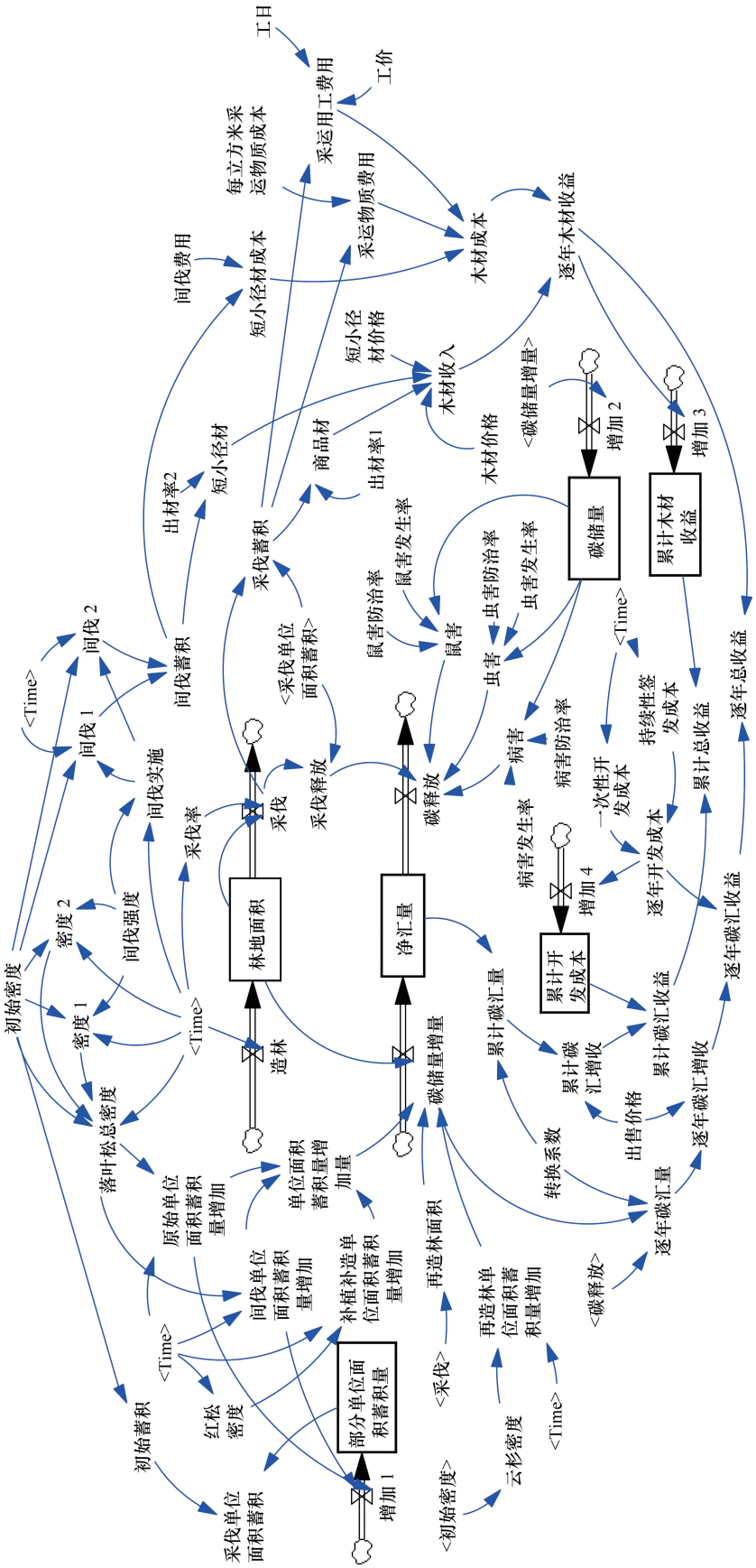

图1 人工林生态经济系统模型

Fig.1 Ecological and economic system model of plantation

$$V_A = 0.2475 \times (1 + 1.57 \times e^{(-0.23 \times A + 6.57)})^{-0.64} \tag{1}$$

红松、云杉单株材积公式:

$$V_A = 0.223254 \times (1 - e^{(-0.05 \times A)})^{5.058732} \tag{2}$$

式中,A 为林龄,V_A为该林木的单株材积。

合理范围内植株密度的提高会对单位面积蓄积量产生正向的影响[31]。基于 CCER 黑龙江省林口县碳汇造林项目设计文件和相关文献,落叶松初始密度为 3330 株/ hm^2。单株材积乘以密度,得到单位面积蓄积量,碳储量的计算采用蓄积量法:

$$C_F = 2.439 \times (V_F \times 1.9 \times 0.5 \times 0.5) \tag{3}$$

式中,C_F为碳储量,V_F为蓄积量。

1.1.2　净汇量

林地面积作为水平变量,有造林和采伐一进一出两个速率变量。与之对应,净汇量有碳储量增量和碳释放一进一出两个速率变量,碳储量增量主要受单位面积蓄积量增加量的影响,而后者又可分为四个部分:

第一部分来源于初植落叶松生长,单位面积蓄积量随着林木的逐年生长而增加,林木成熟后,蓄积量达到最大时,碳储量也达到最大[32]。幼龄林的碳储量逐步积累,中龄林和近熟林的碳储量迅速增加,而成熟林乃至过熟林的固碳能力下降,碳储量也逐渐趋于饱和[33]。

第二部分来源于抚育间伐,间伐能够缓解林木之间的竞争,改善林地结构[34]。在落叶松经营过程中,定期间伐和抚育能促进森林的生长发育,提高森林质量,提供经济效益[35]。间伐后落叶松人工林单位面积蓄积量的年平均生长量和生长率大幅提高,并随间伐强度的增强而提高,保守设计最大间伐强度可为 40%[36]。本文参考同样以落叶松为主要树种的 CCER 塞罕坝机械林场森林经营碳汇项目,与之相同,第 21—30 年间每 5 年一次实施 30%强度的间伐,直至落叶松达到近熟林,且该强度的间伐将使落叶松年平均蓄积生长量平均提高 20%。

第三、第四部分来自第 31—40 年间的红松补植补造和第 41—60 年间与采伐率对应的云杉再造林。除了通过增加造林面积和密度来提高固碳能力外,从落叶松纯林到落叶松—红松—云杉混交林的改变也以更近自然的方式驱动人工林的可持续经营。相比于纯林而言,混交林能提高林木抵御病虫害等自然灾害的能力,维护林地的长期生产力,且带来更大的木材经济收益和诸多边际效益[37]。在采伐阶段,以与采伐率相同的造林率进行云杉种植,能一定程度上抵消采伐所带来的碳释放,对林地进行更新,并投入到下一周期的经营中。

CCER 林业碳汇项目方法学并未考虑碳泄露。但事实上,施肥、运输等都会造成项目外碳排放的增加。而森林抚育项目中的主要泄漏原因是森林灾害,其对森林植被碳储量呈现出明显的负作用[38]。根据相关文献得到碳泄露量与灾害发生率、灾害防治率的关系式如下[39]:

$$C_L = C_F \times P \times (1 - D) \tag{4}$$

式中,C_L为碳泄露,C_F为碳储量,P 为灾害发生率,D 为灾害防治率。

而与自然灾害造成的碳泄露相比,采伐对于碳储量的影响更甚,它会直接降低植被密度或清除植被,造成森林生态系统固碳能力降低和碳储量减少,虫害造成的全球森林碳损失约为 2—107TgC/a,而采伐造成的全球森林碳损失最大可达 900TgC/a[40]。但采伐也并非绝对负面行为,通过合理规划采伐额度能有效改善林木生长环境[41],更有利于森林可持续经营。

1.1.3　碳汇收益和木材收益

人工林经营综合收益包括碳汇收益和木材收益。其中,拟议碳汇项目活动所产生的净汇量超过基线碳储量变化量以上,成为获取碳汇收益的重要前提。根据 CCER 黑龙江翠峦森林经营碳汇项目预计的碳汇量乘以转换系数,得到本项目的预计碳汇量,与碳汇价格结合计算可得碳汇增收。此外,碳汇造林项目还有额外编写项目设计文件、监测报告等一次性开发成本,以及项目审定与减排量核证所产生的费用等。而其它的成本,如造林过程中投入的整地、栽植等费用,其使用目的无法明确区分是为碳汇收益还是木材收益服务,因此不计算

在内。综上,碳汇净收益即为碳汇增收与开发成本的差值。木材收益一个部分是项目前中期抚育、间伐所带来的收益,另一部分是林木成熟后采伐产生的收益。成熟期的林木树高、胸径、蓄积量相比中龄林、近熟林阶段有明显增长,成熟的优质林木出材率和出售价格也高于间伐期的短小径材,所以后期产生的采伐收益会远大于间伐收益。而采伐过程中所产生的成本主要是物质成本即采伐和运输机械使用成本、人力成本等,对木材净收益产生负面影响。

1.2 数据来源

模型中主要数据来源如表 1:

表 1 部分变量数据及数据来源

Table 1 Partial variable data and data sources

变量名称 Variable name	数据值 Data	单位 Unit	数据来源 Data source
病害发生率 Disease incidence	0.00208	无量纲	2015—2019 年中国林业和草原统计年鉴
病害防治率 Disease control rate	0.90270		
虫害发生率 Infestation incidence	0.01392		
虫害防治率 Infestation control rate	0.94308		
鼠害发生率 Rodent incidence	0.01132		
鼠害防治率 Rodent control rate	0.97386		
碳汇价格 Price of carbon sequestration	40	元/t	中国证券网 上海环境能源交易所
木材价格 Timber price	1750	元/m^3	中国木材网
造林面积 Afforestation area	251.6;41;35.4;258.6;80.07	hm^2	CCER 黑龙江省林口县碳汇造林项目设计文件
初始密度 Initial density	3330	株/hm^2	CCER 黑龙江省林口县碳汇造林项目设计文件[42]
红松密度 Korean pine density	900	株/hm^2	CCER 黑龙江翠峦森林经营碳汇项目设计文件
转换系数 Conversion factor	0.44	无量纲	
间伐强度 Thinning intensity	0.30	无量纲	CCER 塞罕坝机械林场森林经营碳汇项目设计文件
一次性开发成本 One-time development cost	200000	元	[43]
持续性签发成本 Ongoing issue cost	150000	元	
采伐率 Cutting rate	0.015	无量纲	[29]
出材率 1 Outturn percentage1	0.8127	无量纲	[44]
出材率 2 Outturn percentage2	0.462	无量纲	[45]
短小径材价格 Price of short and small diameter timber	162	元/m^3	
间伐费用 Thinning cost	54.41	元/m^3	
工价 Wages	40	元/工日	[46]
工日 Man-days	6.80	工日	
采运物质成本 Material costs of harvesting	86.90	元/m^3	

CCER:Chinese Certified Emission Reduction 国家核证自愿减排量;工日:人工费统计的依据,一个工作日的工作时间为 8h

2 情景设计与模拟结果

2.1 情景设计

基于本文构建的人工林生态经济系统模型,设置不同生态调控方式作为不同情景。人工林可持续经营主要是指以人工林生态经济系统平衡与稳定为前提,基于人工林多功能性所追求的多重效益,因此生态调控方式主要包括造林与采伐两个方面:造林方面,因人工林经营面积无法实现连年无条件地扩展,故造林的变化无法通过造林率即新造林面积占总林地面积的比率变化来体现,而需要通过单位面积初始种植密度在合理范围内的调整来反映;采伐方面,不仅要保障林产品稳定高效输出,也要维持森林生态系统的健康稳定,因此考虑

森林类型与经营目标,主伐采伐率依照种植面积设定,间伐采伐率依照材积设定,但都在合理范围内构建采伐体系。参考 CCER 黑龙江省林口县碳汇造林项目设计文件及其他文献,用于培育大中径材的落叶松常见初植密度为 3330 株/hm^2[42],采伐率 1.5%,以此作为基准情景。根据造林技术规程(GB-T15776—2006),东北落叶松商品林的初始种植密度在 2400—5000 株/hm^2。本研究设计了造林与采伐复合的生态调控方式,分别代表合理范围内的高密度-高主伐、高密度-无主伐、低密度-高主伐、低密度-无主伐四种情景。具体参数设置如表 2:

表 2　人工林生态调控情景设计

Table 2　Scenario design of ecological regulation of plantation

情景类型 Type of scenario	初始密度/(株/ hm^2) Initial density	采伐率 Cutting rate
基准情景 Baseline scenario	3330	1.5%
高密度-高主伐 High density and high main cutting	5000	3%
高密度-无主伐 High density and no main cutting	5000	0
低密度-高主伐 Low density and high main cutting	2400	3%
低密度-无主伐 Low density and no main cutting	2400	0

可持续经营目标并不是单一地以生态或经济收益为目标,而是兼顾与平衡两者,向多重经营目标转变,在维护生态环境的同时充分利用人工林资源获取经济收益,并实现人工林长期的、多周期的发展。本文的生态收益主要从碳汇量与碳汇收益上体现,而经济收益则主要从木材收益上体现,故后文的模拟结果也主要针对碳汇量、碳汇收益、木材收益与总收益展开。

2.2　模拟结果

2.2.1　逐年碳汇量与累计碳汇量

本研究设计的典型人工林在 60 年经营周期中逐年碳汇量模拟结果如图 2 所示,具体数值见附表 2。综合五种情景来看,前 40 年中的碳汇整体变动趋势相同,后 20 年中的两种无主伐情景和三种有主伐情景模拟结果发生分化。在三种有主伐的情景下,由于在第 41—60 年每隔 2 年实施一次主伐,并以相同的面积比例造林,碳泄漏具有较明显的年际波动规律。相较于基准情景,高密度情景前 40 年中都呈现出较高的碳汇增量,但在后 20 年中受高主伐率(3%)影响,每 3 年一个碳汇量变动周期,其中 2 年碳储量分别增长约 2000t,另外 1 年碳泄漏近 7000t,从后 20 年来看,高主伐使得人工林由碳汇转为碳源;低密度情景前 40 年中都呈现出较低的碳汇增量,但在后 20 年中受高主伐率(3%)影响,变动周期相同,但碳泄漏量介于基准情景和高密度-高主伐情景模拟结果之间,在 3 年一个周期中的 2 年碳储量分别增长约 1500t,另外 1 年碳泄漏近 2500t,从后 20 年来看,高主伐下的人工林依然有净碳汇产生。

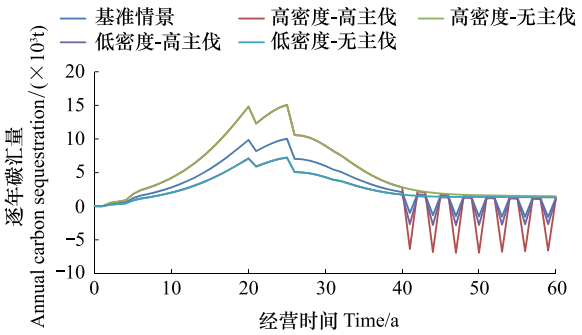

图 2　五种情景下的逐年碳汇量

Fig.2　Annual carbon sequestration under five scenarios

60 年的累计碳汇量模拟结果如图 3 所示。将五种情景对比可得,两种低初植密度情景下的累计碳汇量均小于基准情景下的累计碳汇量。其中,低密度-高主伐情景下的累计碳汇量最低,为 134334t,相比基准情景下的累计碳汇量减少 32.07%;低密度-无主伐情景下的累计碳汇量为 165166t,相比基准情景下的累计碳汇量减少了 16.48%。两种高初植密度情景下的累计碳汇量均大于基准情景下的累计碳汇量。与基准情景下的累计碳汇量相比,高密度-高主伐情景下为 255591t,增长 29.24%;高密度-无主伐情景下为 317602t,增长 60.6%。

分别对比两种无主伐情景和高主伐情景可以发现,前中期产生的碳汇量增长趋势相同,均是在第 41 年之

后开始趋势分化,而是否实施主伐决定了最终可获得的碳汇量。高密度-无主伐情景相对于低密度-无主伐情景累计碳汇量高出 92.29%,高密度-高主伐情景相对于低密度-高主伐情景累计碳汇量高出 90.27%。这些不同生态调控方案对累计碳汇量的影响有别,尽管不是培养大中径材的最佳经营措施,但高密度-无主伐情景下的累计碳汇量最为可观,其余按照累计碳汇量由高到低排序依次是高密度-高主伐、低密度-无主伐、低密度-高主伐情景。本研究设计的初植密度比主伐率对人工林碳汇量的影响更高,两种高初植密度的生态调控方式有效增加了碳汇量,两种低初植密度的生态调控方式则在一定程度上减少了碳汇量。

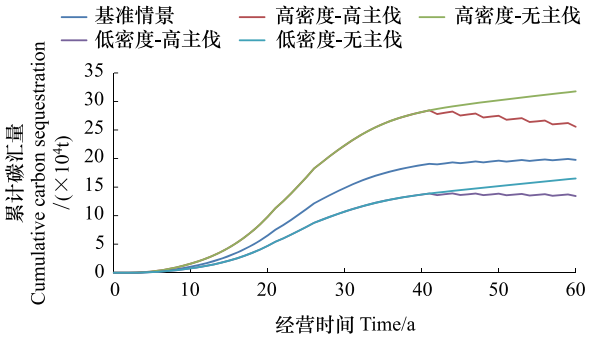

图 3 五种情景下的累计碳汇量

Fig.3 Cumulative carbon sequestration under five scenarios

2.2.2 逐年木材收益与累计木材收益

木材收益包含两个部分,一部分由抚育间伐所产生,而占比更大的则是项目后期采伐成熟林产生的部分。比较不同情景下的逐年木材收益(图 4 与附表 3)可以发现,第 21 年和第 26 年均可获得间伐收益,基准情景下分别为 113.31 万元和 57.39 万元。在同期下,如果不区分初植密度,两种高主伐情景下的间伐收益为基准情景下的间伐收益的 150%,而无主伐情景下的间伐收益则为基准情景下间伐收益的 72%。在三种有主伐的情景下,第 41—60 年间分别有 7 年产生较高的主伐收益,且在同一情景下的 7 次主伐收益不断下降。基准情景下的主伐收益从第 41 年的 618.15 万元降至第 59 年的 601.96 万元,高密度-高主伐和低密度-高主伐情景下的主伐收益分别从第 41 年 1856.31 万元和 891.03 万元,降至第 59 年的 1648.69 万元和 791.37 万元。

将 60 年人工林经营时长内逐年间伐与主伐收益相加,得出不同情景下的累计木材收益模拟结果(图 5)。其中,基准情景(主伐率 1.5%)之下的累计木材收益 4464.13 万元。高密度-无主伐和低密度-无主伐情景下的累计木材收益仅来自于抚育间伐,分别为 256.30 万元和 123.02 万元。高密度-高主伐和低密度-高主伐情景下的累计木材收益更多依靠主伐所获取,分别为 12578.80 万元和 6037.84 万元,分别高出基准情景下的累计木材收益的 181.77%和 35.25%。这一结果意味着,如不考虑碳汇收益而单从木材收益出发,高密度-高主伐情景在五种情景 60 年模拟期中所获取的收益最大。除了对木材经济收益研究以外,从人工林可持续经营的角度来看,随着林龄上升,森林各项功能也由弱到强,再逐步衰竭,最后因自然灾害及人为干预而走向死亡,高密度-高主伐不仅是获得木材收益,也是充分利用木材资源和生态系统功能服务,并更新、重建生态系统的重要调控机制,说明相比无主伐情景模拟结果,在不影响生态系统及生态环境的同时,让人工林继续世代繁衍才是具有更高生态收益的可持续经营决策。

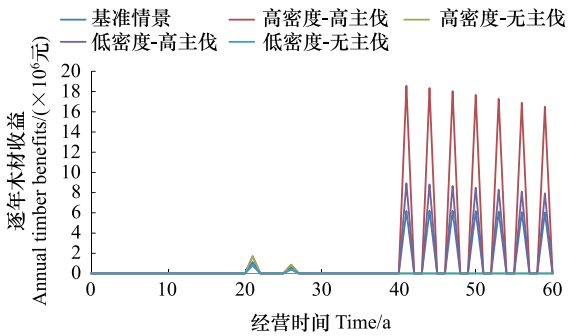

图 4 五种情景下的逐年木材收益

Fig.4 Annual timber benefits under five scenarios

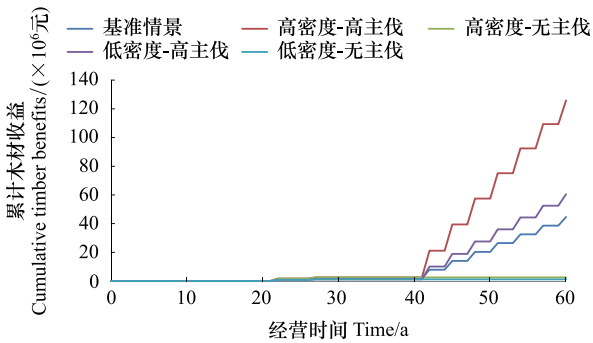

图 5 五种情景下的累计木材收益

Fig.5 Cumulative timber benefits under five scenarios

2.2.3　贴现后的碳汇和木材总收益

将碳汇与木材总收益加总得到 60 年的累计总收益,模拟结果如图 6 所示(逐年总收益见附表 4)。对比五种情景可得,前 40 年的累计总收益变动趋同,相同初植密度情景下的总收益在 41 年之前相等,从第 41 年之后,两种无主伐情景和三种有主伐情景的总收益趋势明显分化,有主伐的情景下总收益呈梯级上升。由于木材收益相比碳汇收益更为可观,累计总收益更大程度上受木材收益影响。以总收益为从高到低排序,依次的情景为高密度-高主伐、低密度-高主伐、高密度-无主伐、低密度-无主伐。基准情景预计可产生 5240.19 万元的总收益,而高密度-高主伐情景下预计产生总收益 13586.20 万元,比基准增长 159.27%,远高于低密度-高主伐情景和其它无主伐情景。低密度-高主伐情景下带来的总收益虽低于高密度-高主伐,但相比于基准也增加了 25.19%,预计达到 6560.17 万元。高密度-无主伐和低密度-无主伐情景下的总收益分别为 1511.71 万元和 768.69 万元,比基准分别减少 71.15%和 85.33%

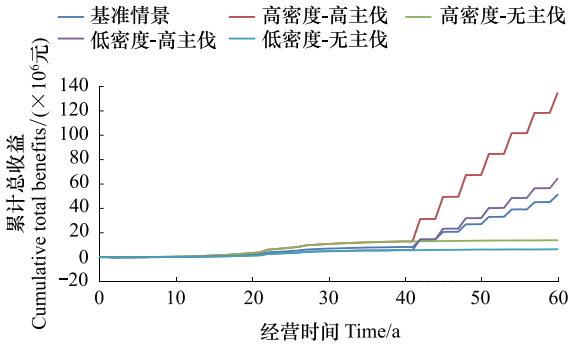

图 6　五种情景下的累计总收益

Fig.6　Cumulative total benefits under five scenarios

将以上五种情景模拟得到的逐年碳汇收益、逐年木材收益进行贴现,可计算出碳汇和木材总收益的净现值,以此评估对人工林采取不同生态调控机制下的可持续经营收益。要将 60 年中各年的碳汇和木材收益贴现到期初,贴现率的大小成为比较不同生态调控机制的关键。参考已有文献,本文以 5%的贴现率代入计算,具体结果如表 3。处于生态调控与可持续经营的目标,总收益净现值从高到低依次是高密度-高主伐情景(1577.25 万元)、低密度-高主伐情景(732.92 万元)、基准情景(671.69 万元)、高密度-无主伐情景(448.86 万元)以及低密度-无主伐情景(192.88 万元)。高初植密度相较于低植密度,可获得更高的碳汇总收益净现值;高主伐相较于无主伐,可获得更高的木材总收益净现值。更重要的是,追求高碳汇总收益净现值并非与追求高木材总收益净现值的目标相冲突。通过生态调控机制的设计,可以实现人工林的可持续经营目标,即获得生态效益和经济效益二者的协同。还需指出的是,将 60 年项目周期贴现到现在,根据气候经济学家的观点,往往选择更低的贴现率,更符合人工林可持续经营在远期不确定性强、生态收益在远期重要性高的特征。因此,如将贴现率由 5%继续降低,不同情景下的总收益净现值还将更高。

表 3　五种情景下的收益净现值

Table 3　The Net present value of benefits under five scenarios

情景类型 Type of scenario	碳汇收益净现值/万元 The net present value of carbon-sequestration benefits	碳汇收益排序 Carbon-sequestration benefits ranking	木材收益净现值/万元 The net present value of timber benefits	木材收益排序 Timber benefits ranking	总收益净现值/万元 The net present value of total benefits	总收益排序 Total benefits ranking
基准情景 Baseline scenario	223.20	3	448.49	3	671.69	3
高密度-高主伐 High density and high main cutting	357.90	2	1219.35	1	1577.25	1
高密度-无主伐 High density and no main cutting	363.56	1	85.30	4	448.86	4
低密度-高主伐 Low density and high main cutting	147.63	5	585.29	2	732.92	2
低密度-无主伐 Low density and no main cutting	151.94	4	40.94	5	192.88	5

3　结论与启示

3.1　结论

(1)找到经济发展与生态保护的平衡点是实现可持续经营的关键,本研究形成的具体生态调控方式为:

第 1—20 年开展落叶松造林活动,第 21—30 年间实施抚育间伐,促进初植落叶松生长,第 31—40 年实施红松的补植补造,营造混交林,第 41—60 年,每隔 2 年对落叶松近熟林实施主伐,并按与采伐率相等的造林率展开云杉造林活动,项目一个周期的运行时长为 60 年,实施地在中国东北地区,以此兼顾生态收益与经济收益。

(2)本研究设计的高初植密度的生态调控方式能有效增加碳汇量,低初植密度的生态调控方式则使碳汇量低于基准情景。对比五种情景下的累计碳汇量,从高到低排序依次为高密度-无主伐情景、高密度-高主伐情景、基准情景、低密度-无主伐情景、低密度-高主伐情景,碳汇收益排序与此相同。

(3)木材收益是人工林可持续经营收益的主要来源,木材收益的其中一部分来源于抚育间伐,但更多来自于主伐行为,本研究设计的高主伐率的生态调控方式能有效提高木材收益,低主伐率的生态调控方式则一定程度降低木材收益;木材收益与总收益从高到低排序依次为高密度-高主伐情景、低密度-高主伐情景、基准情景、高密度-无主伐情景、低密度-无主伐情景。

(4)对比各情景的净现值,若以生态效益为目标,高密度-无主伐情景为最优选择,此时碳汇收益净现值最大(对应碳汇量也最大),若以经济效益为目标,高密度-高主伐情景为最优选择,木材收益净现值和总收益净现值最大。若以可持续经营为目标,平衡生态效益和经济效益,高密度-高主伐情景为最优选择,这种情景可实现累计碳汇量 255591t,相较于高密度-无主伐情景下的累计碳汇量损失有限,对应碳汇收益净现值为 357.9 万元,木材总收益和累计总收益的净现值则分别为 1219.35 万元和 1577.25 万元。

3.2 启示

(1)合理范围内提高造林密度或者在条件允许下增加造林面积能够实现增汇的目标,也有利于生态环境改善。碳汇造林能够有效减缓气候变化,同时随着全国碳市场正式启动运行,碳交易受到了更多的关注,林业碳汇所带来的经济收益也不可忽视。在实现碳中和的目标下,可以把原有的传统造林模式向碳汇造林模式转变。

(2)合理采伐也是实现人工林可持续经营的方式之一。一方面,间伐能够促进单位面积蓄积年平均生长量的增加,改善林地结构并产生经济收益;另一方面,采伐碳储量接近饱和的成熟林和过熟林转而进行新的造林更新能更加充分地利用现有资源,在碳汇量无法得到明显提升甚至减少时,将不多的生态收益转化成更高的经济收益,促进可持续经营。因此,采伐并非完全错误的经济行为,经济收益也并不是站在生态收益的对立面,关键在于对人工林采取的科学生态调控机制以及系统的营造林方式。

(3)构建融合多种生态调控方式的人工林可持续经营项目。以林业碳汇项目为依托,可因地制宜地构建将造林、森林抚育、采伐、再造林更新集于一体的人工林可持续经营项目,实现多生命周期的良性循环发展,在增汇的同时也获得更大的木材收益,缓解因无法采伐所带来的高额机会成本,平衡生态收益与经济收益。

(4)完善林业碳汇市场定价机制。随着碳汇量的增加,可得的碳汇收益也有所提高,碳汇收益远小于木材收益的一个重要因素就是碳定价过低,因此,如能通过政策引导不断完善林业碳汇市场定价机制,开发多层次林业碳汇市场,凸显林业碳汇产品生态价值,将有利于提高经营者和投资者参与林业碳汇项目的积极性,降低人工林碳汇项目经营风险并提高生态—经济总收益。

(5)加快林业经营理念转变与相关法律体系制定。加强对可持续经营理念的宣传与教育,可持续经营并不是单一的以生态收益或经济收益为目标,而是向着平衡生态与经济收益的目标转变。此外,需要进一步完善相关法律体系,合理把控对采伐的限制,在保护生态环境的前提下获取木材收益,提高相关生产经营者的积极性。

参考文献(References):

[1] 陈幸良, 巨茜, 林昆仑. 中国人工林发展现状、问题与对策. 世界林业研究, 2014, 27(6): 54-59.

[2] 童冉, 周本智, 姜丽娜, 周世水, 刘建中, 方禄明, 许礼根, 留凤琴, 陈宏峰. 我国杉木人工林可持续经营面临的问题及发展策略——基于全国分布区的调查. 世界林业研究, 2019, 32(2): 90-96.

[3] 王延飞, 温小荣, 佘光辉. 基于多准则决策分析法的苏北森林可持续经营. 东北林业大学学报, 2012, 40(6): 26-32.

[4] 董乃钧. 对我国森林经营问题的思考. 林业资源管理, 2011,6: 1-5.
[5] 盛炜彤. 关于我国人工林长期生产力的保持. 林业科学研究, 2018, 31(1):1-14.
[6] Astrup R, Bernier P Y, Genet H, Lutz D A, Bright R M. A sensible climate solution for the boreal forest. Nature Climate Change, 2018, 8(1): 11-12.
[7] Verkerk P J, Martinez de Arano I, Palahí M. The bio-economy as an opportunity to tackle wildfires in Mediterranean forest ecosystems. Forest Policy and Economics, 2018, 86: 1-3.
[8] 刘庆, 尹华军, 程新颖, 林波, 胡蓉, 赵春章, 尹春英. 中国人工林生态系统的可持续更新问题与对策. 世界林业研究, 2010, 23(1): 71-75.
[9] 严明, 温常青. 森林采伐管理改革之我见. 林业经济, 2015, 37(2): 52-54.
[10] Pandey H. Implications of anthropogenic disturbances for species diversity, recruitment and carbon density in the mid-hills forests of Nepal. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12: 1-10.
[11] 田惠玲, 朱建华, 何潇, 陈新云, 简尊吉, 李宸宇, 郭学媛, 黄国胜, 肖文发. 基于随机森林模型的东北三省乔木林生物质碳储量预测. 林业科学, 2022, 58(4): 40-50.
[12] 丁华, 程琴. 运用实物期权法对林业碳汇项目的价值评估. 东北林业大学学报, 2020, 48(5): 139-143, 147.
[13] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述. 植物生态学报, 2004, 28(5): 692-703.
[14] Köhl M, Ehrhart H P, Knauf M, Neupane P R. A viable indicator approach for assessing sustainable forest management in terms of carbon emissions and removals. Ecological Indicators, 2020, 111: 106057.
[15] Morgan E A, Buckwell A, Guidi C, Garcia B, Rimmer L, Cadman T, MacKey B. Capturing multiple forest ecosystem services for just benefit sharing: the basket of benefits approach. Ecosystem Services, 2022, 55: 101421.
[16] 包爱军. 森林生态系统管理与林业经济发展的耦合关系研究——评《森林生态系统智能管理》. 林业经济, 2021, 43(4): 97.
[17] Hjortsø C N, Stræde S. Strategic multiple-use forest planning in Lithuania—applying multi-criteria decision-making and scenario analysis for decision support in an economy in transition. Forest Policy and Economics, 2001, 3(3/4): 175-188.
[18] Nishizawa T, Kay S, Schuler J, Klein N, Herzog F, Aurbacher J, Zander P. Ecological-economic modelling of traditional agroforestry to promote farmland biodiversity with cost-effective payments. Sustainability, 2022, 14(9): 1-21.
[19] Drechsler M, Wtzold F, Grimm V. The hitchhiker's guide to generic ecological-economic modelling of land-use-based biodiversity conservation policies. Ecological Modelling, 2022, 465: 109861.
[20] Grasso M. Ecological-economic model for optimal mangrove trade off between forestry and fishery production: comparing a dynamic optimization and a simulation model. Ecological Modelling, 1998, 112(2/3): 131-150.
[21] Li H, Gartner D I, Mou P, Trettin C C. A landscape model (LEEMATH) to evaluate effects of management impacts on timber and wildlife habitat. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 27(1/2/3): 263-292.
[22] Bach C F. Economic incentives for sustainable management: a small optimal control model for tropical forestry. Ecological Economics, 1999, 30(2): 251-265.
[23] 高群. 国外生态—经济系统整合模型研究进展. 自然资源学报, 2003, 18(3): 375-384.
[24] 兰宇飞, 薛惠锋, 董会忠. 基于系统动力学的区域林业经济发展战略仿真与调控研究. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2010, 9(4): 83-89.
[25] Machado R R, Conceio S V, Leite H G, Souza A L, Wolff E. Evaluation of forest growth and carbon stock in forestry projects by system dynamics. Journal of Cleaner Production, 2015, 96: 520-530.
[26] 蔡秀亭, 姜钰. 基于森林生态安全的林业产业结构优化战略仿真分析. 生态经济, 2020, 36(7): 90-94, 104.
[27] 刘挺, 苟思, 刘超, 贺宇欣, 庄文化, 刘铁刚. 基于系统动力学的桉树生长用水模型构建. 水土保持通报, 2018, 38(6): 187-194.
[28] Nunery J S, Keeton W S. Forest carbon storage in the northeastern United States: net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products. Forest Ecology and Management, 2010, 259(8): 1363-1375.
[29] 陈伟, 程宝栋, 宋维明. REDD+框架下不同林地经营情景的碳汇收益分析. 林业经济, 2016, 38(11): 76-81, 107.
[30] 林玮, 白青松, 陈雪梅, 梁东成, 陈勇, 薛克娜, 何波祥, 文珊娜, 连辉明, 唐昌亮. 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. 西南林业大学学报: 自然科学, 2020, 40(1): 28-37.
[31] 郑颖, 冯健, 于世河, 陆爱君, 王琴, 王骞春. 初植密度对 4 个落叶松无性系生长与干形的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2021, 45(6): 72-80.
[32] 李峰, 刘桂英, 王力刚. 黑龙江省森林碳汇价值评价及碳汇潜力分析. 防护林科技, 2011,1: 87-88.
[33] 邱书志, 薄乖民, 丁骞, 王伟, 汪淑筠, 王少明, 闫毓斌, 赵亮生. 白龙江林区森林植被碳储量和碳汇功能研究. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(1): 88-93.

[34] 王芸, 赵鹏祥, 杨永辉, 李治国. 间伐对华北落叶松林林分结构稳定性的影响. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 193-199.
[35] 黄鑫春. 不同抚育间伐强度对辽东落叶松林生长的影响. 林业资源管理, 2016,1: 65-71.
[36] 陈天成, 柳杰, 张芸香, 郭晋平, 郭跃东. 关帝山林区华北落叶松人工林不同强度间伐的生长效应研究. 山西林业科技, 2015, 44(2): 13-19.
[37] 王林龙, 吴水荣, 袁红姗. 混交林与纯林的生态经济优势机理分析. 林业经济问题, 2018, 38(4): 18-22, 101.
[38] 吴胜男, 李岩泉, 于大炮, 周莉, 周旺明, 郭焱, 王晓雨, 代力民. 基于 VAR 模型的森林植被碳储量影响因素分析——以陕西省为例. 生态学报, 2015, 35(1): 196-203.
[39] 黄萍, 黄颖利, 李小强, 成丽红. 森林碳汇资源开发潜力定量评价与研究——以黑龙江省为例. 资源开发与市场, 2012, 28(9): 786-788.
[40] 刘魏魏, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 造林再造林、森林采伐、气候变化、CO_2浓度升高、火灾和虫害对森林固碳能力的影响. 生态学报, 2016, 36(8): 2113-2122.
[41] 薛龙飞, 罗小锋, 李兆亮, 吴贤荣. 中国森林碳汇的空间溢出效应与影响因素——基于大陆 31 个省(市、区)森林资源清查数据的空间计量分析. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1744-1754.
[42] 马炜, 孙玉军. 长白落叶松人工林密度表的编制及应用. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 69-75.
[43] 曹先磊, 张颖. 落叶松碳汇造林项目 CCER 开发成本动态核算研究. 统计与信息论坛, 2019, 34(3): 43-49.
[44] 王红彦, 左旭, 王道龙, 毕于运. 中国林木剩余物数量估算. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(2): 29-38, 43.
[45] 孙洪志, 屈红军, 石丽艳, 张杰, 任青山. 次生林抚育改造的效果. 东北林业大学学报, 2004, 32(2): 97-98.
[46] 吉鹏飞, 涂传建, 王晓丹. 林产品造林成本和采伐收益调查方法浅析——以湖北省通山县 2016 年杉木造林成本和采伐收益调查方法为范例. 绿色财会, 2017,8: 29-36.

附表:

附表 1　模型中的变量及函数关系

Appendix table 1　Variables and functional relationships in the model

序号 Serial number	变量名称 Variable name	初值/函数关系 Initial value/Function relation	单位 Unit
1	FINAL TIME(终止时间)	60	a
2	INITIAL TIME(起始时间)	0	a
3	SAVEPER(数据记录步长)	1	a [0,?]
4	TIME STEP(时间步长)	1	年 [0,?]
5	一次性开发成本	一次性开发成本=IF THEN ELSE(Time=1,200000, 0)	元
6	云杉密度	云杉密度=初始密度	株/hm^2
7	再造林单位面积蓄积量增加	再造林单位面积蓄积量增加=IF THEN ELSE(Time>41, 云杉密度×0.223254×(1-EXP(-0.040717×(Time+6-41)))^(3.46576)-云杉密度×0.223254×(1-EXP(-0.040717×(Time+6-41-1)))^(3.46576), 0)	m^3/hm^2
8	再造林面积	再造林面积=采伐	hm^2
9	出售价格	40	元/t
10	出材率 1	0.8127	无量纲
11	出材率 2	0.462	无量纲
12	初始密度	3330	株/hm^2
13	初始蓄积	初始蓄积=初始密度×0.2475×(1+1.57×EXP(-0.23×3+6.57))^(-0.64)	m^3/hm^2
14	单位面积蓄积量增加量	单位面积蓄积量增加量=原始单位面积蓄积量增加+间伐单位面积蓄积量增加+补植补造单位面积蓄积量增加	m^3/hm^2
15	原始单位面积蓄积量增加	原始单位面积蓄积量增加=IF THEN ELSE(Time>1,落叶松总密度×0.2475×(1+1.57×EXP(-0.23×(Time+3)+6.57))^(-0.64)-落叶松总密度×0.2475×(1+1.57×EXP(-0.23×(Time+2)+6.57))^(-0.64), 0)	m^3/hm^2
16	商品材	商品材=采伐蓄积×出材率 1	m^3
17	增加 1	增加 1=原始单位面积蓄积量增加+间伐单位面积蓄积量增加	m^3/hm^2
18	增加 2	增加 2=碳储量增量	t
19	增加 3	增加 3=木材逐年收益	元
20	增加 4	增加 4=逐年开发成本	元
21	密度 1	密度 1=IF THEN ELSE(Time>=21:AND:Time<=25, 初始密度×(1-间伐强度), 0)	株/hm^2
22	密度 2	密度 2=IF THEN ELSE(Time>=26, 初始密度×(1-间伐强度)×(1-间伐强度), 0)	株/hm^2
23	工价	40	元/工日
24	工日	6.8	工日
25	持续性签发成本	持续性签发成本=IF THEN ELSE(Time=10:OR:Time=15:OR:Time=20:OR:Time=30:OR:Time=35:OR:Time=40:OR:Time=50:OR:Time=55:OR:Time=60, 150000, 0)	元
26	木材价格	1750	元/m^3
27	木材总收益	木材总收益= INTEG (增加 3,0)	元
28	木材成本	木材成本=短小径材成本+采运物质费用+采运用工费用	元
29	木材收入	木材收入=木材价格×商品材+短小径材×短小径材价格	元
30	木材逐年收益	木材逐年收益=木材收入-木材成本	元
31	林地面积	林地面积= INTEG (造林-采伐,0)	hm^2
32	每立方米采运物质成本	86.9	元/m^3
33	病害	病害=碳储量×病害发生率×(1-病害防治率)	t
34	病害发生率	0.00208	无量纲

续表

序号 Serial number	变量名称 Variable name	初值/函数关系 Initial value/Function relation	单位 Unit
35	病害防治率	0.9027	无量纲
36	短小径材	短小径材=间伐蓄积×出材率 2	m^3
37	短小径材价格	162	元/m^3
38	短小径材成本	短小径材成本=间伐费用×间伐蓄积	元
39	碳储量	碳储量= INTEG (增加 2,0)	t
40	碳储量增量	碳储量增量=2.439×(单位面积蓄积量增加量×林地面积×1.9×0.5×0.5)+2.439×(再造林单位面积蓄积量增加×再造林面积×1.9×0.5×0.5)	t
41	碳释放	碳释放=病害+虫害+采伐释放+鼠害	t
42	累计开发成本	累计开发成本= INTEG (增加 4,0)	元
43	累计总收益	累计总收益=木材总收益+累计碳汇收益	元
44	累计碳汇增收	累计碳汇增收=出售价格×累计碳汇量	元
45	累计碳汇收益	累计碳汇收益=累计碳汇增收-累计开发成本	元
46	累计碳汇量	累计碳汇量=转换系数×预计减排量	t
47	红松密度	红松密度=IF THEN ELSE(Time>=31, 900, 0)	株/hm^2
48	落叶松总密度	落叶松总密度=IF THEN ELSE(Time>=21:AND:Time<=60, 密度 1+密度 2, 初始密度)	株/hm^2
49	虫害	虫害=碳储量×虫害发生率×(1-虫害防治率)	t
50	虫害发生率	0.01392	无量纲
51	虫害防治率	0.94308	无量纲
52	补植补造单位面积蓄积量增加	补植补造单位面积蓄积量增加=IF THEN ELSE(Time>31, 红松密度×0.223254×(1-EXP(-0.040717×(Time+6-31)))^(3.46576)-红松密度×0.223254×(1-EXP(-0.040717×(Time+6-1-31)))^(3.46576), 0)	m^3/hm^2
53	转换系数	0.44	无量纲
54	逐年开发成本	逐年开发成本=一次性开发成本+持续性签发成本	元
55	逐年总收益	逐年总收益=逐年碳汇收益+木材逐年收益	元
56	逐年碳汇	逐年碳汇=转换系数×(碳储量增量-碳释放)	t
57	逐年碳汇增收	逐年碳汇增收=IF THEN ELSE(逐年碳汇×出售价格>0, 出售价格×逐年碳汇, 0)	元
58	逐年碳汇收益	逐年碳汇收益=逐年碳汇增收-逐年开发成本	元
59	造林	造林=WITH LOOKUP (Time,([(0,0)-(60,300)],(0,0),(1,251.6),(2,41),(3,35.4),(4,258.6),(5,80.07),(6,0),(60,0)))	hm^2
60	部分单位面积蓄积量	部分单位面积蓄积量= INTEG (增加 1,0)	m^3/hm^2
61	采伐	采伐=林地面积×采伐率	hm^2
62	采伐单位面积蓄积	采伐单位面积蓄积=初始蓄积+部分单位面积蓄积量	m^3/hm^2
63	采伐率	采伐率=IF THEN ELSE(Time=41:OR:Time=44:OR:Time=47:OR:Time=50:OR:Time=53:OR:Time=56:OR:Time=59, 0.015, 0)	无量纲
64	采伐蓄积	采伐蓄积=采伐×采伐单位面积蓄积	m^3
65	采伐释放	采伐释放=2.439×(采伐单位面积蓄积×采伐×1.9×0.5×0.5)	t
66	采运物质费用	采运物质费用=采伐蓄积×每 m^3 采运物质成本	元
67	采运用工费用	采运用工费用=工日×工价×采伐蓄积	元
68	间伐 1	间伐 1=IF THEN ELSE(Time=21,初始密度×间伐实施×666.67×(0.2475×(1+1.57×EXP(-0.23×(21+3)+6.57))^(-0.64)), 0)	m^3

续表

序号 Serial number	变量名称 Variable name	初值/函数关系 Initial value/Function relation	单位 Unit
69	间伐 2	间伐 2=IF THEN ELSE(Time=26,初始密度×间伐实施×间伐实施×666.67×(0.2475×(1+1.57×EXP(-0.23×(26+3)+6.57))^(-0.64)),0)	m^3
70	间伐单位面积蓄积量增加	间伐单位面积蓄积量增加=IF THEN ELSE(Time<=60:AND:Time>=21,落叶松总密度×((0.2475×(1+1.57×EXP(-0.23×(60+3)+6.57))^(-0.64)-0.2475×(1+1.57×EXP(-0.23×(21+3)+6.57))^(-0.64))×0.2/(60-21)),0)	m^3/hm^2
71	间伐实施	间伐实施=IF THEN ELSE(Time=21:OR:Time=26, 间伐强度, 0)	无量纲
72	间伐强度	0.3	无量纲
73	间伐蓄积	间伐蓄积=间伐 1+间伐 2	m^3
74	间伐费用	54.41	元/m^3
75	预计减排量	预计减排量= INTEG (碳储量增量-碳释放,0)	t
76	鼠害	鼠害=碳储量×鼠害发生率×(1-鼠害防治率)	t
77	鼠害发生率	0.01132	无量纲
78	鼠害防治率	0.97386	无量纲

附表 2　逐年碳汇量/t

Appendix table 2　Annual carbon sequestration

经营时间/a Time	基准情景 Baseline scenario	高密度-高主伐 High density and high main cutting	高密度-无主伐 High density and no main cutting	低密度-高主伐 Low density and high main cutting	低密度-无主伐 Low density and no main cutting
1	0	0	0	0	0
2	336.334	505.006	505.006	242.403	242.403
3	452.253	679.059	679.059	325.948	325.948
4	586.123	880.065	880.065	422.431	422.431
5	1212.74	1820.94	1820.94	874.05	874.05
6	1592.46	2391.08	2391.08	1147.72	1147.72
7	1838.54	2760.57	2760.57	1325.07	1325.07
8	2121.44	3185.35	3185.35	1528.97	1528.97
9	2445.99	3672.65	3672.65	1762.87	1762.87
10	2817.39	4230.32	4230.32	2030.55	2030.55
11	3241.05	4866.44	4866.44	2335.89	2335.89
12	3722.37	5589.14	5589.14	2682.79	2682.79
13	4266.46	6406.09	6406.09	3074.92	3074.92
14	4877.56	7323.66	7323.66	3515.36	3515.36
15	5558.45	8346.02	8346.02	4006.09	4006.09
16	6309.45	9473.64	9473.64	4547.35	4547.35
17	7127.18	10701.5	10701.5	5136.71	5136.71
18	8003.24	12016.9	12016.9	5768.1	5768.1
19	8922.46	13397.1	13397.1	6430.6	6430.6
20	9861.52	14807.1	14807.1	7107.4	7107.4
21	8188.94	12295.7	12295.7	5901.93	5901.93
22	8798.09	13210.3	13210.3	6340.96	6340.96
23	9334.06	14015.1	14015.1	6727.25	6727.25
24	9759.01	14653.2	14653.2	7033.52	7033.52
25	10036.4	15069.6	15069.6	7233.42	7233.42
26	7047.72	10582.2	10582.2	5079.44	5079.44

续表

经营时间/a Time	基准情景 Baseline scenario	高密度-高主伐 High density and high main cutting	高密度-无主伐 High density and no main cutting	低密度-高主伐 Low density and high main cutting	低密度-无主伐 Low density and no main cutting
27	6980.16	10480.7	10480.7	5030.75	5030.75
28	6773.69	10170.7	10170.7	4881.94	4881.94
29	6439	9668.17	9668.17	4640.72	4640.72
30	5997.72	9005.58	9005.58	4322.68	4322.68
31	5479.28	8227.16	8227.16	3949.04	3949.04
32	5119.28	7584.83	7584.83	3746.24	3746.24
33	4604.25	6780.93	6780.93	3392.08	3392.08
34	4106.71	6001.41	6001.41	3051.57	3051.57
35	3645.36	5275.14	5275.14	2737.78	2737.78
36	3232.25	4620.78	4620.78	2458.99	2458.99
37	2873.02	4047.45	4047.45	2219.01	2219.01
38	2568.59	3556.97	3556.97	2018.17	2018.17
39	2316.22	3145.69	3145.69	1854.31	1854.31
40	2111.18	2806.77	2806.77	1723.81	1723.81
41	-1015.83	-6367.34	2531.7	-2649.29	1622.25
42	1788.04	2230.59	2311.29	1493.15	1545.06
43	1690.28	2061.21	2136.68	1437.6	1487.79
44	-1340.02	-6812.99	1999.81	-2798.39	1446.45
45	1532.74	1758.75	1893.4	1322.56	1417.5
46	1491.98	1681.4	1811.18	1304.11	1397.89
47	-1476.37	-6935.61	1748.01	-2815.53	1385.13
48	1414.63	1517.04	1699.51	1240.1	1377.16
49	1398.85	1482.87	1662.08	1235.65	1372.3
50	-1525.91	-6897.72	1632.91	-2777.04	1369.24
51	1352.84	1379.75	1609.7	1187.73	1366.99
52	1345.07	1362.9	1590.67	1185.74	1364.75
53	-1546.73	-6798.37	1574.36	-2727.22	1361.94
54	1306.43	1282.97	1559.75	1138.17	1358.15
55	1298.85	1271.12	1545.95	1133.82	1353.08
56	-1565.82	-6684.43	1532.36	-2684.86	1346.54
57	1257.47	1197.49	1518.61	1081.12	1338.46
58	1247.09	1185.56	1504.28	1073.05	1328.77
59	-1593.48	-6575.24	1489.18	-2655.53	1317.43
60	1199.94	1111.97	1473.22	1014.66	1304.59

附表 3 逐年木材收益/元

Appendix table 3 Annual timber benefits

经营时间/a Time	基准情景 Baseline scenario	高密度-高主伐 High density and high main cutting	高密度-无主伐 High density and no main cutting	低密度-高主伐 Low density and high main cutting	低密度-无主伐 Low density and no main cutting
1—20	0	0	0	0	0
21	1133070	1701300	1701300	816625	816625
22—25	0	0	0	0	0
26	573873	861672	861672	413603	413603
27—40	0	0	0	0	0

续表

经营时间/a Time	基准情景 Baseline scenario	高密度-高主伐 High density and high main cutting	高密度-无主伐 High density and no main cutting	低密度-高主伐 Low density and high main cutting	低密度-无主伐 Low density and no main cutting
41	6181520	18563100	0	8910300	0
42—43	0	0	0	0	0
44	6203490	18345400	0	8805790	0
45—46	0	0	0	0	0
47	6189490	18025300	0	8652130	0
48—49	0	0	0	0	0
50	6156900	17657300	0	8475500	0
51—52	0	0	0	0	0
53	6114940	17269900	0	8289560	0
54—55	0	0	0	0	0
56	6068390	16877500	0	8101170	0
57—58	0	0	0	0	0
59	6019630	16486900	0	7913710	0
60	0	0	0	0	0

附表 4　逐年总收益/元

Appendix table 4　Annual total benefits

经营时间/a Time	基准情景 Baseline scenario	高密度-高主伐 High density and high main cutting	高密度-无主伐 High density and no main cutting	低密度-高主伐 Low density and high main cutting	低密度-无主伐 Low density and no main cutting
1	-200000	-200000	-200000	-200000	-200000
2	13453.4	20200.2	20200.2	9696.11	9696.11
3	18090.1	27162.4	27162.4	13037.9	13037.9
4	23444.9	35202.6	35202.6	16897.2	16897.2
5	48509.8	72837.5	72837.5	34962	34962
6	63698.5	95643.4	95643.4	45908.8	45908.8
7	73541.6	110423	110423	53003	53003
8	84857.8	127414	127414	61158.8	61158.8
9	97839.5	146906	146906	70514.9	70514.9
10	-37304.3	19212.7	19212.7	-68777.9	-68777.9
11	129642	194657	194657	93435.5	93435.5
12	148895	223566	223566	107312	107312
13	170658	256244	256244	122997	122997
14	195102	292946	292946	140614	140614
15	72338	183841	183841	10243.6	10243.6
16	252378	378945	378945	181894	181894
17	285087	428059	428059	205468	205468
18	320130	480675	480675	230724	230724
19	356898	535883	535883	257224	257224
20	244461	442283	442283	134296	134296
21	1460620	2193130	2193130	1052700	1052700
22	351923	528414	528414	253639	253639
23	373362	560604	560604	269090	269090
24	390361	586127	586127	281341	281341
25	401454	602784	602784	289337	289337

续表

经营时间/a Time	基准情景 Baseline scenario	高密度-高主伐 High density and high main cutting	高密度-无主伐 High density and no main cutting	低密度-高主伐 Low density and high main cutting	低密度-无主伐 Low density and no main cutting
26	855782	1284960	1284960	616780	616780
27	279207	419229	419229	201230	201230
28	270948	406828	406828	195278	195278
29	257560	386727	386727	185629	185629
30	89908.8	210223	210223	22907.1	22907.1
31	219171	329086	329086	157961	157961
32	204771	303393	303393	149850	149850
33	184170	271237	271237	135683	135683
34	164268	240056	240056	122063	122063
35	-4185.5	61005.7	61005.7	-40489	-40489
36	129290	184831	184831	98359.7	98359.7
37	114921	161898	161898	88760.2	88760.2
38	102744	142279	142279	80726.6	80726.6
39	92648.8	125828	125828	74172.4	74172.4
40	-65552.7	-37729.1	-37729.1	-81047.8	-81047.8
41	6181520	18563100	101268	8910300	64890
42	71521.7	89223.4	92451.6	59726.1	61802.4
43	67611.3	82448.6	85467.2	57504.1	59511.6
44	6203490	18345400	79992.3	8805790	57857.8
45	61309.5	70350.1	75736	52902.3	56700
46	59679.1	67255.9	72447.4	52164.3	55915.7
47	6189490	18025300	69920.2	8652130	55405
48	56585.1	60681.4	67980.6	49603.8	55086.6
49	55954	59314.8	66483.3	49426.1	54891.8
50	6006900	17507300	-84683.6	8325500	-95230.5
51	54113.8	55189.9	64387.9	47509.2	54679.6
52	53802.9	54516.2	63626.8	47429.7	54589.9
53	6114940	17269900	62974.4	8289560	54477.7
54	52257.2	51318.8	62390.1	45526.8	54326
55	-98046.1	-99155.3	-88161.9	-104647	-95876.6
56	6068390	16877500	61294.6	8101170	53861.7
57	50298.6	47899.6	60744.3	43245	53538.5
58	49883.5	47422.2	60171.2	42922	53150.8
59	6019630	16486900	59567	7913710	52697.4
60	-102003	-105521	-91071.2	-109414	-97816.5