

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190331

## 大兴安岭盘古林场森林碳汇木材复合经营规划

董灵波<sup>1,2</sup> 蔺雪莹<sup>1</sup> 刘兆刚<sup>1,2</sup>

(1. 东北林业大学林学院, 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040;  
2. 黑龙江省森林资源高效培育技术研发团队, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**【目的】长期以来, 我国森林经营研究主要集中在林分(或样地)尺度上, 以期总结出适用于各种林型的最优经营模式, 而忽略了不同经营选项的时空配置问题。因此, 本文将在传统木材收获规划模型的基础上引入碳增量目标建立能够兼顾不同择伐强度时空配置的多目标空间经营规划模型, 以期为我国森林资源的多目标经营管理提供理论依据和技术支撑。【方法】本研究在森林分类经营思想指导下, 以大兴安岭塔河林业局盘古林场为研究对象, 以规划周期内木材生产和地上乔木层碳增量的经济收益为经营目标, 以规划期内木材均衡收获、期末碳储量及择伐措施时空分布为主要约束, 最后采用模拟退火算法建立经营单位尺度森林多目标空间经营规划模型; 基于该模型, 在我国当前碳贸易和木材市场的双重约束下, 确定盘古林场 50 年规划期内最优森林经营方案, 分析最优森林经营方案内各分期木材收获量、碳增量以及择伐措施的时空分布特征。【结果】当碳价格为 120 元/t 时, 盘古林场 50 年规划周期内碳汇木材复合经营的经济收益可达  $1.54 \times 10^8$  元, 其中木材收益  $1.37 \times 10^8$  元, 碳收益  $0.17 \times 10^8$  元; 规划期内木材产量累计达  $1.78 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, 碳增量达  $1.68 \times 10^6$  t, 期末碳储量达  $5.99 \times 10^6$  t, 单位面积平均碳储量较规划期初增加了约 38.98%; 规划期内受保护面积 44.36%, 总择伐面积 48.01%, 未经营面积 7.63%, 其中重度择伐面积约占研究区域总面积的 41.78%; 同时, 各分期内不同择伐作业方式的配置存在显著差异, 其中重度择伐作业的收获蓄积、择伐面积以及择伐小班数量均占各自总体的 90% 以上; 最优森林经营方案具有显著的空间分布特征, 但均符合规划模型的各项约束条件。【结论】森林碳汇木材复合经营规划结果具有多方面优势: (1) 均衡收获能够保证整个经营单位在规划期内始终获得相对稳定的经济收入, 从而保障林区经济社会的可持续发展; (2) 期末碳储量约束能够有效避免森林资源的过度采伐, 进而确保森林碳汇效益的持续发挥; (3) 规划模型能够在兼顾森林木材生产和碳汇功能的同时合理安排经营措施的时空分布, 这些均对我国森林资源的多目标经营管理具有重要借鉴意义, 但进一步研究和确定恰当的约束参数是构建切实可行的森林多目标经营规划的关键。

**关键词:** 碳增量; 木材生产; 经营规划; 空间约束; 模拟退火算法

中图分类号: S757.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2020)08-0001-11

引文格式: 董灵波, 蔺雪莹, 刘兆刚. 大兴安岭盘古林场森林碳汇木材复合经营规划 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 1-11. Dong Lingbo, Lin Xueying, Liu Zhaogang. Forest carbon sink-timber compound management planning of Pangu Forest Farm in Great Xing'an Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 1-11.

## Forest carbon sink-timber compound management planning of Pangu Forest Farm in Great Xing'an Mountains of northeastern China

Dong Lingbo<sup>1,2</sup> Lin Xueying<sup>1</sup> Liu Zhaogang<sup>1,2</sup>

(1. School of Forestry, Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

2. Technology Development Team for High-Efficient Silviculture of Forest Resources of Heilongjiang Province, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:** [Objective] To provide the optimal forest management paradigm for various forest types, the research of forest management in our country had mainly been performed on the scale of forest stand (or

收稿日期: 2019-08-20 修回日期: 2019-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700562), 国家重点研发计划课题(2017YFC0504103), 黑龙江省头雁创新团队计划项目。

第一作者: 董灵波, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: Farrell0503@126.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学林学院。

责任编辑: 刘兆刚, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林经理。Email: lzg19700602@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

sample plot), however the importance of temporal and spatial configuration of alternative thinning treatments had been ignored for a long term. Therefore, a spatial explicitly forest management planning model was developed by integrating forest carbon increment objective into traditional timber harvest scheduling problem, which can provide some new theories and technologies for the multi-objective management of forest resources in China. [Method] With the guidance of forest category management theory, a practical forest multi-objective spatial management planning model (FMS), including the forest timber production and carbon increments of aboveground tree-layer, was developed for the Pangu Forest Farm in Great Xing'an Mountains of northeastern China using the simulated annealing algorithm. To improve the practicality of the planning model, FMS subjected to the even-flow constraints of harvest volume, the inventory constraint of forest carbon stocks, and the spatial constraints of different thinning treatments. Based on FMS and the constraints of carbon trading and timber market in China, the optimal forest management plans for a 50-years planning horizon of Pangu Forest Farm was optimized. Then, the amount of timber harvest, the amount of carbon increments, and the temporal and spatial configuration of alternative thinning treatments for each period were quantificationally analyzed. [Result] The joint net present value (NPV) of timber production and carbon increments during the 50-years planning horizon for Pangu Forest Farm was as large as  $1.54 \times 10^8$  CNY, in which the NPVs of timber production and carbon increments were  $1.37 \times 10^8$  and  $0.17 \times 10^8$  CNY, respectively when the carbon price was assumed as 120 CNY/t. The amount of harvest timber and carbon increments during the planning horizon were estimated as  $1.78 \times 10^6$  m<sup>3</sup> and  $1.68 \times 10^6$  t, and the carbon stock of aboveground tree biomass was  $5.99 \times 10^6$  t, in which the carbon stock of aboveground tree biomass at the ending of planning horizon increased by 38.98% with respect to that at the beginning of planning horizon. Within the optimal management plan, the protected area, thinned area and no-thinned area accounted for 44.36%, 48.01% and 7.63%, respectively, in which the thinned area with high intensity accounted for 41.78% of the total forest area in this region. In addition, some significant differences were observed among the configuration of alternative management activities for each period, in which the amount of harvest volume and thinned area, as well as the number of thinned sub-compartments all accounted for approximately 90% of their gross for each period. The distributions of thinning treatments presented significantly spatial characteristics for the optimal management plans, however the pattern was all conformed with the constraints. [Conclusion] The outputs of FMS have some significant advantages: (1) forest managers always can obtain some pediocratic economic benefits for each period due to the even-flow constraints of harvest volume; (2) the forest resources can be protected from over-harvesting due to the inventory constraints of carbon stocks, which are meaningful to promote the function of forest carbon sequestration; (3) the forest planning model can provide the optimal temporal and spatial configuration of forest management activities. Obviously, all these advantages are helpful for the multi-objective management of forest resources in our country. However, the values of some key constraint parameters still need further research to improve the practicality of the proposed planning model in future.

**Key words:** carbon increment; timber production; management planning; spatial constraint; simulated annealing algorithm

森林作为陆地生态系统的主体,能够以26%的陆地面积储存整个陆地生态系统约80%以上的碳储量,同时年均固碳量也可达到整个陆地生态系统的60%以上,因此森林在缓解全球气候变化中起着十分重要的作用。2015年,全球195个缔约国正式签署了具有法律效力的《巴黎协定》,其中“减少毁林和森林退化排放以及通过可持续经营森林增加碳汇

行动(条款5.2)”的途径被进一步明确。根据第八次森林资源连续清查数据可知,我国人工林面积居世界首位,达0.69亿hm<sup>2</sup>,但继续造林难度越来越大、成本投入越来越高、见效也越来越慢的问题日益突出<sup>[1]</sup>。在此背景下,如何通过科学、合理的经营活动来提升森林质量、促进森林碳汇已成为我国森林经营领域中亟待解决的关键问题。

长期以来, 我国森林经营研究多集中在林分(或样地)尺度, 主要探讨不同经营方式(如采伐强度、方式等)对林分结构和功能的影响, 进而总结、提出适用于不同林型的最优经营模式<sup>[2-3]</sup>, 但关于不同经营措施在时空尺度上合理配置的研究却相对较少。森林经营措施的时空配置本质上是一种组合优化问题。早在 20 世纪 80—90 年代, 我国学者已经采用数学优化技术对木材永续利用问题进行了一些研究, 比较有代表性的如周国模<sup>[4]</sup>、黄家荣等<sup>[5]</sup>采用多目标规划方法研究了同龄林的收获调整; 于政中等<sup>[6]</sup>、宋铁英等<sup>[7]</sup>采用动态优化方法研究了异龄林的收获调整, 但这些研究均属于单目标的森林经营规划, 不符合我国现阶段森林多目标经营的实际需求; 近些年来, 刘莉等<sup>[8]</sup>采用加拿大的 FSOS 模型研究了我国东北林区森林的多目标经营规划问题, 该系统涉及的经营目标包括水源存储和净化、二氧化碳截获、野生动物生境保护、生物多样性维持、可视景观质量以及木材生产等; 戎建涛等<sup>[9]</sup>以森林资源二类调查数据为基础, 采用多目标规划方法建立了能够兼顾木材生产和碳增量的规划模型, 但这些研究却并未进一步考虑不同经营措施的空间配置问题。

现有研究已表明不同林分间的生态效益与功能往往存在着一定的交互作用区域, 如李际平等<sup>[10]</sup>研究表明杉木(*Cunninghamia lanceolata*)—阔叶混交林中边缘区内的物种多向性要大于杉木林和阔叶林核心区; 高建云等<sup>[11]</sup>研究表明热带常绿季雨林中鸟类分布特征与其距离森林边缘的距离显著相关, 因此在森林经营规划中应着重考虑不同经营措施的时空分布问题。现阶段, 邻接约束和绿量约束是森林经营规划领域中使用最广泛的空间约束形式<sup>[12]</sup>。邻接在森林经营规划研究中通常指具有一定公共边界长度的两个林分<sup>[13]</sup>, 因此邻接约束能够保证相邻小班在空间上的连续覆盖, 从而避免形成大面积的皆伐(或采伐)迹地, 而绿量约束则可以被看作允许相邻林分被同时采伐的时间缓冲窗口, 有利于进一步实现林分在空间上的连续覆盖。国外学者已经在这方面开展了较多研究, 如 Boston 等<sup>[14]</sup>评价了不同邻接和绿量约束范围对森林空间收获安排问题的影响; Bettinger 等<sup>[15]</sup>建立了能够兼顾森林木材生产和野生动物生境保护的空间规划模型; Baskent 等<sup>[16]</sup>建立了能够兼顾森林木材生产、水源涵养和碳储量的多目标规划模型。我国学者在此方面的研究则相对较少, 仅陈伯望等<sup>[17-18]</sup>先后以德国南部 Winnefeld 林班的 41 个挪威云杉(*Picea abies*)林为例分别探讨了空间邻接约束和均衡约束对森林中期(20 年)经营规划方案的影响; 董灵波等<sup>[19]</sup>评估了单位限制模型

(unit restriction model)和面积限制模型(area restriction model)对大兴安岭盘古林场森林空间收获安排的影响, 但这些研究并未涉及多目标的经营规划问题。

综上所述, 鉴于当前人类对全球气候变化问题的持续关注, 本研究在森林分类经营思想指导下, 以大兴安岭地区塔河林业局盘古林场为对象, 以 50 年规划周期内木材生产和地上乔木层碳增量的经济收益为经营目标, 以规划期内木材均衡收获、期末碳储量及择伐措施时空分布为主要约束, 采用模拟退火算法建立林场尺度森林多目标空间经营规划模型, 为区域内森林资源的多目标经营提供理论依据和技术支撑。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于黑龙江省塔河林业局盘古林场, 总面积 123 423 hm<sup>2</sup>, 其中有林地约占总面积的 96.72%。该区属于大兴安岭北坡, 全区地形整体呈东北—西南走向, 最高海拔 1 397 m, 最低海拔 230 m, 相对高差 1 167 m; 坡度介于 0°~60°之间, 平均约为 8.63°, 标准差为 6.95°; 气候属于寒温带大陆性季风气候, 冬寒夏暖, 昼夜温差较大, 平均温度-3 ℃, 平均降雨量 746 mm, 多集中在 6—8 月, 林内积雪期长达 5 个月, 积雪深度达 30~50 cm; 土壤类型主要为暗棕色针叶林土, 土壤深度整体偏薄, 其中处于薄(<30 cm)和中等级别(30~60 cm)的林分面积约占整个区域的 41.30% 和 54.35%; 该区植被属于大兴安岭区系, 植物种类相对简单, 主要林分类型为天然落叶松(*Larix gmelinii*)林、天然白桦(*Betula platyphylla*)林以及天然针阔混交林, 此外还有少量的落叶松人工林, 原始落叶松林是该地区森林的顶级群落类型。乔木建群种主要包括落叶松、白桦、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、旱柳(*Salix matsudana*)等。

### 1.2 数据来源

研究采用盘古林场 2008 年森林资源二类调查数据, 包括数字林相图(shp 格式)和属性数据, 共包括 325 个林班、6 421 个小班。区域内所有小班面积均介于 0.67~50 hm<sup>2</sup>, 平均值为 19.21 hm<sup>2</sup>, 标准差为 11.51 hm<sup>2</sup>。为有效模拟各不同林分生长动态及其对经营措施的响应, 根据各小班的树种组成和生态学特性, 将其划分为天然落叶松林、天然白桦林、针叶混交林、阔叶混交林和针阔混交林 5 种林型, 此外还包括少量的非林地, 如居民区、道路、河流、沼泽地等。在森林分类经营思想指导下, 本文根据各小班

位置、地形以及土壤等信息将其划分为水土保持林、护路林、护岸林和商品林共 4 类,各林种划分标准为:(1)若小班矢量边界与道路和河流的 100 m 缓冲区存在交集,则分别将其划归为护路林和护岸林;(2)若小班质心坡度大于 25°或平均土壤厚度小于 30 cm 则将其划分为水土保持林;(3)其余林分则整

体划归为商品林,所有择伐作业均应安排在此类林分内进行。根据上述标准对所有小班进行分类,结果显示约有 44.36% 的小班属于保护区。盘古林场森林年龄分布特征如表 1 所示,区域内小班年龄多集中在 41~80 年之间,约占林场总面积的 70% 左右。

表 1 盘古林场森林年龄分布特征

Tab. 1 Distribution characteristics of forest age in Pangu Forest Farm

年龄/a Age/year	天然落叶松林 Natural <i>Larix gmelini</i> forest (GF)	天然白桦林 Natural <i>Betula platyphylla</i> forest (BPF)	针叶混交林 Mixed coniferous forest (MCF)	阔叶混交林 Mixed broadleaved forest (MBF)	针阔混交林 Mixed broadleaf- conifer forest (BCF)	总计 Total	hm <sup>2</sup> ha
1~20	433	3 317	469	1 625	1 342	7 186	
21~40	382	5 637	4 506	537	1 055	12 117	
41~60	4 713	12 791	18 686	4 762	1 073	42 025	
61~80	17 553	431	11 371	12 002	133	41 490	
81~100	7 168		1 403	4 366		12 937	
101~120	2 822		132	670		3 624	
总计 Total	33 071	22 176	36 567	23 962	3 603	119 379	

规划过程中林分生长和收获预测及其对各种择伐强度的响应结合采用王鹤智<sup>[20]</sup>建立的东北林区主要森林类型林分级生长与收获模型以及董利虎<sup>[21]</sup>建立的该地区主要林型蓄积-生物量换算模型进行定量模拟。该套模型系统是基于东北地区大量固定样地调查数据,在相关经验或理论生长模型基础上拟合而来,并采用独立样本进行检验,模型模拟精度整体较高,能够满足长期森林经营规划的要求。具体流程为:(1)根据王鹤智<sup>[20]</sup>所建林分生长与收获模型预测各小班不同生长阶段的林分特征变量,如平均胸径、平均树高、株数密度、蓄积等;(2)采用董利虎<sup>[21]</sup>所建林分生物量-蓄积量模型(即  $\ln W = a + b \ln V$ ),将林分蓄积量转换为生物量;(3)结合不同林型特征以及各树种含碳率综合确定各林型含碳率,即天然落叶松林为 0.521 1、天然白桦林为 0.491 4、针叶混交林为 0.521 4、针阔混交林为 0.507 5、阔叶混交林为 0.493 5。各模型具体形式及参数估计详见王鹤智<sup>[20]</sup>、董利虎<sup>[21]</sup>,此处不再赘述。

### 1.3 规划模型

#### 1.3.1 目标函数

虽然我国已经全面停止了天然林的商业性采伐行为,但现有研究均表明适度地人为干扰(如择伐、抚育等)既有利于形成健康稳定的森林生态系统,同时在此过程中也能够产生一定的木材,因此木材生产是森林生态系统一项重要的、不可回避的基础功能。同时,随着全球气候的持续变化,森林通过光合作用吸收大气中 CO<sub>2</sub>,进而发挥显著的碳汇作用,因

此其在抑制气候变化中的作用正受到越来越多的重视,特别是随着全球 190 多个国家和地区对《巴黎协定》的正式签署。因此,本文以研究区域 50 年规划周期(10 个 5 年分期)内木材生产和乔木层碳增量的综合经济收益最大化为目标函数,即:

$$\text{Max } Z = \text{NPV}^{\text{timber}} + \text{NPV}^{\text{carbon}} \quad (1)$$

式中:Z 为规划问题的目标函数,即整个规划周期内木材收获和乔木层碳增量总经济收益的净现值;NPV<sup>timber</sup> 为整个规划周期内木材收益的净现值;NPV<sup>carbon</sup> 为整个规划周期内乔木层碳增量经济收益的净现值。

#### 1.3.2 木材生产

如前所述,研究区域已经全面禁止了大面积、高强度的森林采伐活动,因此本文采用 3 种不同强度的择伐作业活动(均指蓄积强度),即轻度择伐(10%)、中度择伐(20%)和重度择伐(30%)。由于木材价格往往受树种、材种以及市场等多方面因素的影响,很难通过模型进行定量模拟和预测,因此本文仅以 2012 年黑龙江省林业厅对各树种原木的指导价格为基础开展研究,即假设天然落叶松林、天然白桦林、针叶混交林、针阔混交林和阔叶混交林原木价格分别为 1 050、1 000、1 090、870 和 1 170 元/m<sup>3</sup>。择伐成本因不同作业强度而异,分别为 800、1 600 和 2 400 元/hm<sup>2</sup>。文中所有与木材生产相关的经济收益和经营成本均按 3% 的贴现率进行折现,即换算为净现值。因此,规划模型中对应的木材经济收益及其产量可描述为:

$$NPV^{\text{timber}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N npv_{ijt}^{\text{timber}} x_{ijt} \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N v_{ijt} x_{ijt} \right) = \sum_{t=1}^T H_t = TH \quad (3)$$

上述方程中, 式(2)为规划期内木材总经济收益的计算公式, 式(3)为第  $t$  规划分期和整个规划周期内木材产量的计算公式。其中:  $i$  为任意经营单位(即小班);  $M$  为区域内小班数量;  $j$  为任意一种经营措施;  $N$  为各小班候选经营措施数量, 本研究中包括 3 种不同强度的择伐作业和无采伐作业方式;  $t$  为任意规划分期;  $T$  为总经营规划分期数;  $npv_{ijt}^{\text{timber}}$  为第  $i$  个小班在第  $t$  分期采用第  $j$  种作业方式的木材经济收益;  $x_{ijt}$  为 0-1 型变量, 若林分  $i$  在第  $t$  分期采用第  $j$  中作业方式, 则  $x_{ijt} = 1$ , 否则,  $x_{ijt} = 0$ ;  $v_{ijt}$  为林分  $i$  在第  $t$  分期采用第  $j$  种作业方式的蓄积收获量;  $H_t$  为第  $t$  分期的蓄积收获量;  $TH$  为整个规划期内的木材收获量。

从森林经营实践角度出发, 各分期蓄积的均衡收获不仅有利于合理安排作业人员和设备, 同时还有利于经营单位在整个规划周期内始终获得相对稳定的经济收入, 从而有利于实现林场尺度林业的可持续发展。由于研究区域内林分条件和森林经营情况较为复杂, 若要执行严格的收获均衡(即各分期木材收获量完全一致)不仅较为困难, 同时也不符合我国林业生产的实际情况, 因此本文采用如式(4)所示的约束方式, 将各分期收获蓄积约束在一定的范围内, 具体表示如下:

$$(1-\alpha)H_{t-1} \leq H_t \leq (1+\alpha)H_{t+1} \quad \forall t \quad (4)$$

式中:  $H_{t-1}$ ,  $H_t$ ,  $H_{t+1}$  分别为第  $t-1$  分期、第  $t$  分期和第  $t+1$  分期的蓄积收获量;  $\alpha$  为相邻分期收获蓄积量的差异, 本研究均假设为 15%, 即  $H_t \in [0.85H_{t-1}, 1.15H_{t+1}]$ ;  $\forall t$  表示任意分期。

### 1.3.3 碳增量

由于森林生态系统中土壤层、枯落物层以及灌草层的碳储量往往具有较强的空间异质性, 同时现阶段也缺乏可靠的预测模型, 因此本研究仅考虑规划周期内乔木层地上部分的碳增量。根据前述林分级生长与收获模型可知, 在规划周期内特定小班的碳增量( $\Delta t$ )可表示为: 当前规划分期(即第  $t$  分期)碳储量( $C_t$ )减去前一个分期(即第  $t-1$  分期)碳储量( $C_{t-1}$ ), 即  $\Delta t = C_t - C_{t-1}$ 。显然, 在不考虑自然干扰的情况下, 若该小班未被采伐, 则其相邻分期内碳增量应始终满足  $\Delta t \geq 0$  的要求, 并随着规划分期的增加呈逐渐减小趋势; 但对于采伐小班, 第  $t$  分期内的碳增量  $\Delta t$  应为负数, 但第  $t+1$  分期内的碳增量(即

$\Delta t+1$ )则应为正数, 且此后各分期碳增量也应为正数, 并且此后同样随规划分期数的增加呈减小趋势。碳价格是影响本文规划过程和结果的关键参数之一, 根据《中国碳排放交易网》2013—2017 年统计数据假设为 120 元/t。同木材生产一样, 所有与碳增量相关的经济收益也均按 3% 的贴现率进行折现。因此, 规划模型中对应的碳增量及其经济收益可表示为:

$$NPV^{\text{carbon}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T npv_{ijt}^{\text{carbon}} x_{ijt} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{ijt} x_{ijt} = C_t \quad \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T (C_t - C_{t-1}) = TC \quad (7)$$

上述方程中, 式(5)用于计算整个规划周期内碳增量的总经济收益, 式(6)用于计算第  $t$  分期时区域内的总碳储量, 式(7)用于计算第  $t$  分期内整个区域内的总碳增量。其中:  $npv_{ijt}^{\text{carbon}}$  为第  $i$  个小班在第  $t$  分期采用第  $j$  种作业方式后林分继续生长至规划期末时碳增量的经济收益;  $c_{ijt}$  为第  $i$  各小班在第  $t$  分期采用第  $j$  中作业方式后的碳储量;  $C_t$  和  $C_{t-1}$  分别为第  $t$  分期和第  $t-1$  分期区域内的碳储量;  $TC$  为整个规划周期内的碳增量。

由于我国当前木材价格显著高于碳价格(约为 10 倍), 因此若直接采用上述模型会造成规划周期内重度择伐的林分数量和比例均显著大于其他作业方式的问题, 同时引起规划期内木材产量较高、碳汇功能减弱的现象。因此, 为了更好地兼顾森林的木材生产和碳汇功能, 本文采用如式(8)所示的形式约束规划周期内应满足的最低碳增量目标, 具体形式为:

$$TC \geq \beta \cdot TC^* \quad (8)$$

式中:  $TC^*$  表示当区域内对所有林分均不采取任何采伐方式时林分正常生长至规划期末时的碳增量, 即  $TC^* = TC_T - TC_0$ , 其中  $TC_T$  为第  $T$  分期(规划期末)的碳储量,  $TC_0$  为第 0 分期(规划期初)的碳储量;  $\beta$  为规划周期内真实(即有择伐作业的情况下)碳增量较  $TC^*$  的增加比例, 本研究限定为 20%。

### 1.3.4 空间约束

空间约束主要限制规划期内不同择伐作业强度的时空分布特征, 采用 Murray<sup>[22]</sup> 提出的邻接约束和绿量约束。为了更好地说明邻接约束和绿量约束的作用方式, 现假设某地区有一个 5 行  $\times$  5 列的栅格林分, 每个栅格代表不同经营小班, 各小班采伐方式仅为 2 种(即皆伐和不采伐), 且各小班采伐周期均如

图中数字所示(图1)。当绿量约束期为0时(图1A),且以A(3,3)小班为核心,由于A(3,3)和A(3,2)、A(4,2)采伐分期相同,因此该种情形可连续采伐的小班数量为3个;当绿量约束为1时(图1B),除了前述的A(3,2)和A(4,2)小班以外,根据邻接林分的递推关系可知,小班A(3,3)与A(2,3)和A(4,3)、A(4,3)与A(5,3)、A(4,2)与A(4,1)和A(5,1)均相差一个分期,因此这些林分也同样处于邻接和绿量约束范围内,即可同时采伐8个小班。显然,随着绿量约束期的增加,可同时采伐的小班数量呈典型非线性增加趋势。因此,根据上述约束示例,绿量约束通用规则可概括为:若某林分采伐周期为 $t$ ,绿量约束期为 $n$ ,则该林分的绿量约束范围为 $T_m \in \{m_1 = t - n, m_2 = t - (n-1), \dots, m_{n-1} = t - 1, m_n = t, m_{n+1} = t + 1, m_{n+2} = t + 2, m_{2n} = t + n\}$ ,若 $m_i < 0$ ,则 $m_i = 0$ ;若 $m_i > T$ ,则 $m_i = T$ 。显然,当绿量约束分期较长时,同时采伐的小班数量也会显著增加。因此,经营决策者需根据实际情况对最大连续采伐面积做出限制。为此,本文对邻接约束和绿量约束进行有效整合,构建出如下约束形式:

$$A_i \cdot x_{ijt} + \sum_{k \in N_i \cup S_i} \sum_{m=1}^{T_m} A_k \cdot x_{kjm} \leq U_{\max} \quad \forall i \quad (9)$$

式中: $A_i, A_k$ 分别为第 $i$ 个、第 $k$ 个小班的面积; $k$ 为第 $i$ 个小班的相邻小班; $N_i$ 为与第 $i$ 小班相邻的其他小班组成的集合; $S_i$ 为与 $N_i$ 中的小班相邻的其他小班,呈明显的递推关系; $m$ 为规划分期 $t$ 的任意一个相邻分期; $T_m$ 为规划分期 $t$ 的绿量约束范围; $U_{\max}$ 为最大连续采伐面积; $\forall i$ 表示任意小班。

### 1.3.5 其他约束

除上述约束外,本研究还考虑了规划周期内

3	0	0	1	2
4	1	2	5	3
5	3	3	1	4
4	3	4	0	1
4	1	3	2	5

A: 0 分期 Period 0

3	0	0	1	2
4	1	2	5	3
5	3	3	1	4
4	3	4	0	1
4	1	3	2	5

B: 1 分期 Period 1

数字代表不同采伐分期;红色表示核心小班,蓝色和绿色分别代表0个和1个分期绿量约束的小班。The number within each cell represents different harvesting periods; red color represents the core management unit, and the blue and green color represent potential adjacency management units with zero and one period constraints of green-up, respectively.

图1 采伐措施绿量约束示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of green-up constraints of harvest schedules

不同小班采伐次数和决策变量属性的约束。为了防止规划期内对各小班的过度采伐,式(10)要求在整个规划周期内每个小班的择伐次数至多不超过1次。此外,由于幼中龄林的林分蓄积生长率、碳增长率均相对较高,但林木出材率及其经济价值却相对较低,因此要求所有林分的采伐活动必须满足最小年龄约束(式(11))。根据《国家森林资源连续清查技术规定》中相关优势树种(组)的龄组划分标准设定:天然落叶松林、针叶混交林和针阔混交林的最小择伐年龄均为61年,而天然白桦林、阔叶混交林的最小择伐年龄则为41年。式(12)则进一步要求规划模型中的所有决策变量均为0-1型整数变量,即相同小班不允许被同时安排多种作业方式。鉴于研究区域内部分小班处于生态脆弱区,不宜开展木材生产经营活动,因此择伐作业仅安排在商品林中进行,而严格禁止对各种公益林的任何人为干扰。据此,规划期内各小班采伐次数和决策变量属性约束可概括如下:

$$\sum_{t=1}^T x_{ijt} \leq 1 \quad \forall i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^M \text{Age}_{ijt} > \text{Age}_{\min} \quad \forall t, j \quad (11)$$

$$x_{ijt} = \begin{cases} \{0\} & \text{if } i \in \{\text{River, Road, SoilPro}\} \\ \{0, 1\} & \text{if } i \in \{\text{ComFor}\} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\text{Age}_{ijt}$ 表示第 $i$ 小班采用第 $j$ 种经营方式后第 $t$ 分期的年龄; $\text{Age}_{\min}$ 表示林分的最小采伐年龄; $\forall t, j$ 表示任意分期和任意采伐方式;ComFor、River、Road、SoilPro分别代表商品林、护岸林、护路林和水土保持林的小班集合,若小班 $i$ 属于护岸林、护路林和水土保持林,则决策变量 $x_{ijt} = 0$ ,即在第 $t$ 分期不选择任何作业方式;若小班 $i$ 属于商品林,则决策变量 $x_{ijt} = \{0, 1\}$ ,即可在第 $t$ 分期选择是否选用第 $j$ 种作业方式。

### 1.4 优化算法

由于模型中存在大量的非线性约束和整数变量,难以用传统的数学方法(如线性规划、穷举法等)求解,因此本文采用模拟退火算法求解此类问题。模拟退火算法是局部搜索算法的一种,其最显著的特点是算法能够以Metropolis准则有选择地接受使目标函数值恶化的解,从而使算法能够从局部最优解中“跳出”而不会收敛于局部最优解。目前,理论上已证明模拟退火算法能够以概率1接近最优值,是一个全局最优算法<sup>[12]</sup>。模拟退火算法的求解步骤如下:

(1)设置模拟退火算法参数值,包括初始温度

IT、终止温度 FT、冷却速率 CR 和每温度下重复次数 NUM。

(2) 读取林分数据、经济参数和空间邻接数据。

(3) 根据不同小班属性(式(10)、(11)), 对每个小班随机分配择伐作业方式(包括择伐分期和强度), 生成初始解  $S_0$ 。

(4) 针对初始解  $S_0$ , 分别检验是否符合式(4)、式(8)和式(9)的约束条件, 若违背任意约束, 则返回步骤(3); 否则, 执行步骤(5)。

(5) 计算初始解  $S_0$  对应的各分期木材产量  $H_i$ 、总木材产量 HT、总木材经济收益  $NPV^{\text{timber}}$ 、各分期碳增量  $C_i$ 、总碳增量 TC、总碳增量经济收益  $NPV^{\text{carbon}}$  以及规划期内总经济收益  $NPV^{\text{total}}$ , 并分别进行以下赋值操作:

① 赋值给当前解  $S_{\text{current}}$  和最优解  $S_{\text{best}}$ , 即  $S_{\text{current}} = S_{\text{best}} = S_0$ ;

② 赋值给当前目标函数值  $Z_{\text{current}}$  和最优目标函数值  $Z_{\text{best}}$ , 即  $Z_{\text{current}} = Z_{\text{best}} = NPV^{\text{total}}$ 。

(6) 设置当前温度  $T_{\text{current}}$  为初始温度 IT(即  $T_{\text{current}} = IT$ )、当前温度下重复次数为 Count = 1。

(7) 在当前解  $S_{\text{current}}$  基础上, 随机选择 1 个小班及其择伐作业方式(需满足式(10)~(12)), 并保持其他小班作业方式不变, 生成新解  $S_{\text{new}}$ 。

(8) 判断新解  $S_{\text{new}}$  是否满足式(4)、式(8)和式(9)约束, 若违背任意约束, 返回步骤(7); 否则执行步骤(9)。

(9) 计算新解  $S_{\text{new}}$  对应的规划期内总经济收益  $NPV^{\text{total}}$  及其他参数, 将其赋值给新的目标函数值变量  $Z_{\text{new}}$ , 即  $Z_{\text{new}} = NPV^{\text{total}}$ 。

(10) 根据以下标准判断是否接受新解  $S_{\text{new}}$ :

① 若  $Z_{\text{new}} \geq Z_{\text{current}}$ , 则接受新解并将其赋值给当前解(即  $S_{\text{current}} = S_{\text{new}}$ )和最优解( $S_{\text{best}} = S_{\text{new}}$ ), 且将其目标函数赋值给当前值, 即  $Z_{\text{current}} = Z_{\text{new}}$ ;

② 若  $Z_{\text{new}} < Z_{\text{current}}$ , 则按概率  $p = \exp((Z_{\text{new}} - Z_{\text{current}})/T_{\text{current}})$  接受恶化解, 同时将其赋值给当前解(即  $S_{\text{current}} = S_{\text{new}}$ )。

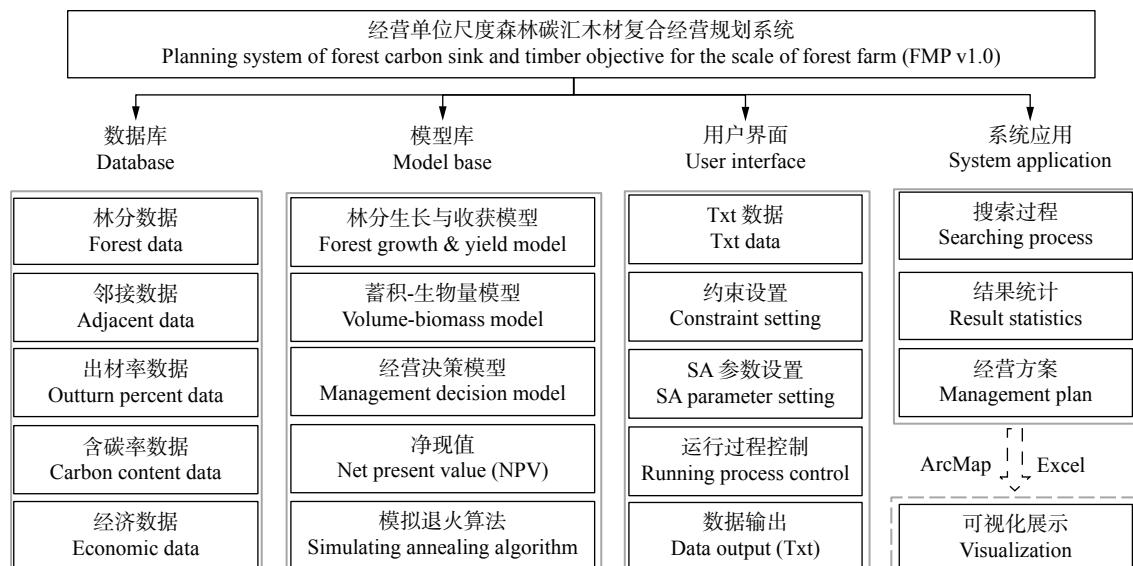
(11) 重新设置每温度下重复次数为: Count = Count + 1。

(12) 判断算法是否达到降温标准: 若 Count > NUM, 则执行降温过程(即  $T_{\text{current}} = T_{\text{current}} \cdot CR$ ), 且令 Count = 1; 否则, 返回步骤(7)。

(13) 判断算法是否结束: 若  $T_{\text{current}} \geq FT$ , 则返回步骤(7); 否则, 算法结束。

(14) 输出最优解  $S_{\text{best}}$  及其对应的各项参数, 包括各分期木材产量  $H_i$ 、总木材产量 HT、总木材经济收益  $NPV^{\text{timber}}$ 、各分期碳增量  $C_i$ 、总碳增量 TC、总碳增量经济收益  $NPV^{\text{carbon}}$  以及规划期内总经济收益  $NPV^{\text{total}}$  等。

综上所述, 经营规划是一个复杂的决策优化问题, 因此本文以 Microsoft Visual Basic 6.0 为平台, 在面向对象编程思想指导下对林分生长与收获模型、经营规划模型和模拟退火算法进行有效整合, 进而建立了经营单位尺度森林多目标空间经营规划模拟平台(FMP v1.0; 图 2)。经过前期试验模拟后, 模拟退火算法的 4 个参数分别设置为: 初始温度 = 10 000, 终止温度 = 1, 冷却速率 = 0.99, 每温度下重复次数 = 100。在该套参数体系约束下, 算法每次优化共可进行 91 700 次有效迭代, 即理论上可产生 91 700 个有



可视化展示部分需借助 ArcMap 和 Excel 软件实现。Visualization module needs the assistance of ArcMap and Excel software.

图 2 经营单位尺度森林碳汇木材复合经营规划系统框架图

Fig. 2 Frame diagram of planning system for forest carbon sink and timber compound management planning at the scale of forest farm

效森林经营方案(即不违背任何约束)。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟退火算法搜索过程

在给定模拟退火算法初始参数、林分空间关系、生长模型和经济参数(包括木材价格、碳价格、采伐成本以及银行利率)后,可通过FMP软件平台进行多次模拟,从而获得多个高质量的森林经营方案。图3给出了30次随机模拟中最优目标解的优化过程。在Core i7/RAM 4GB/Window 7/VB6.0软硬件环境下求解该问题平均耗时约1.50 h(即16.98个/s)。由于木材价格显著高于碳价格(约20倍),因此优化过程中木材净现值始终处于主导地位,且算法获得的总净现值和木材净现值均随着迭代次数的增加而增加,大约经过7万次迭代后达到稳定状态,此时总净现值和木材净现值分别为 $1.54 \times 10^8$ 和 $1.37 \times 10^8$ 元,较优化期初增加了约2.03和2.74倍。但优化过程中,碳增量对应的净现值则随着迭代次数的增加呈现下降趋势,目标函数值达到稳定状态后的碳净现值约为 $0.17 \times 10^8$ 元,较优化期初减小了约30.98%。显然,这3种净现值的变化过程说明在当前给定参数配置下,算法倾向于采伐更多的木材而非优先固定碳。

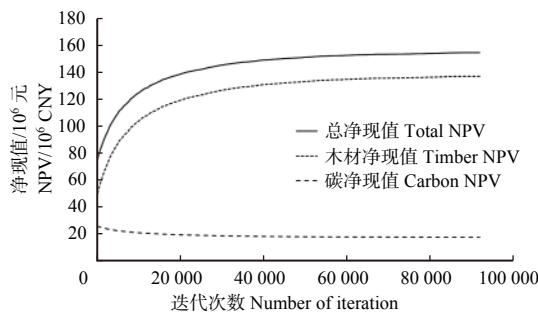


图3 规划期内总净现值、木材净现值和碳净现值变化过程

Fig. 3 Developing process of total NPV, timber NPV and carbon NPV within the planning period

优化过程中各种物质量(即木材产量、规划期内碳增量和期末碳储量)的变化趋势进一步验证了:在当前给定参数配置下算法倾向于采伐更多的木材而非优先固定碳的结论(图4)。最优解迭代过程中,期末碳储量由优化期初的 $6.61 \times 10^6$ t下降到优化期末的 $5.99 \times 10^6$ t,减少了约10.15%;与此相对应,规划期内的碳增量同样呈显著的下降趋势,稳定状态时规划期内累计碳增量( $1.68 \times 10^6$ t)较优化期初下降了约26.96%;但在优化过程中,木材产量随迭代次数呈显著增加趋势,稳定状态时的木材产量约为 $1.78 \times 10^6$ m<sup>3</sup>,较优化期初增加了约2.44倍。此外,

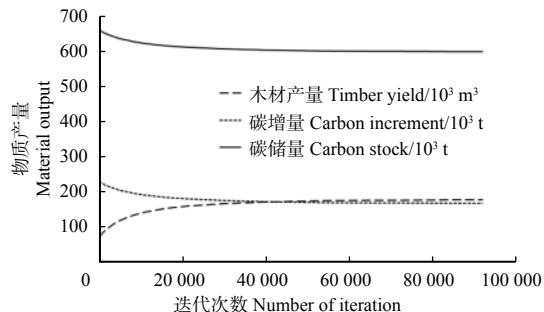


图4 规划期内木材产量、碳增量和碳储量变化过程

Fig. 4 Developing process of timber yield, carbon increment and carbon stock within the planning period

算法优化过程中木材产量和规划期内碳增量的数值在大约经过4.5万次迭代后达到相等状态,之后规划期内碳增量的数值则始终略小于木材产量。

### 2.2 最优森林经营方案

最优森林经营方案中各分期收获蓄积、择伐面积及择伐小班数量如表2所示,可以看出规划周期内各分期平均收获蓄积约为 $0.18 \times 10^6$ m<sup>3</sup>,变异系数达22.80%,其中第1分期收获量最大( $0.23 \times 10^6$ m<sup>3</sup>),第7分期收获量最小( $0.11 \times 10^6$ m<sup>3</sup>);规划期内各分期重度择伐的收获蓄积所占比例最大,平均约为91.90%,而轻度择伐和中度择伐的收获蓄积量均相对较小,平均仅约为1.59%和6.50%;规划周期内择伐小班数量为3198个,占区域内小班总数的49.81%,择伐面积59251hm<sup>2</sup>,占区域总面积的48.01%,各分期采伐面积及小班数量的分配比例均与收获蓄积基本一致。

各分期不同择伐作业方式的空间分布如图5所示,可以看出各种择伐作业措施具有明显的空间分布特征,主要表现为:(1)道路、河流100m沿线范围的林分均未安排任何择伐作业活动;(2)坡度较大区域也未安排任何择伐作业活动;(3)各种择伐作业措施在空间上呈明显的离散分布;(4)相近规划分期( $T_m$ 范围内)同一种择伐作业活动的连续分布面积均小于用户给定的 $U_{max}$ 约束,显然这些特征与规划模型中相应的约束条件相符合。

## 3 结论与讨论

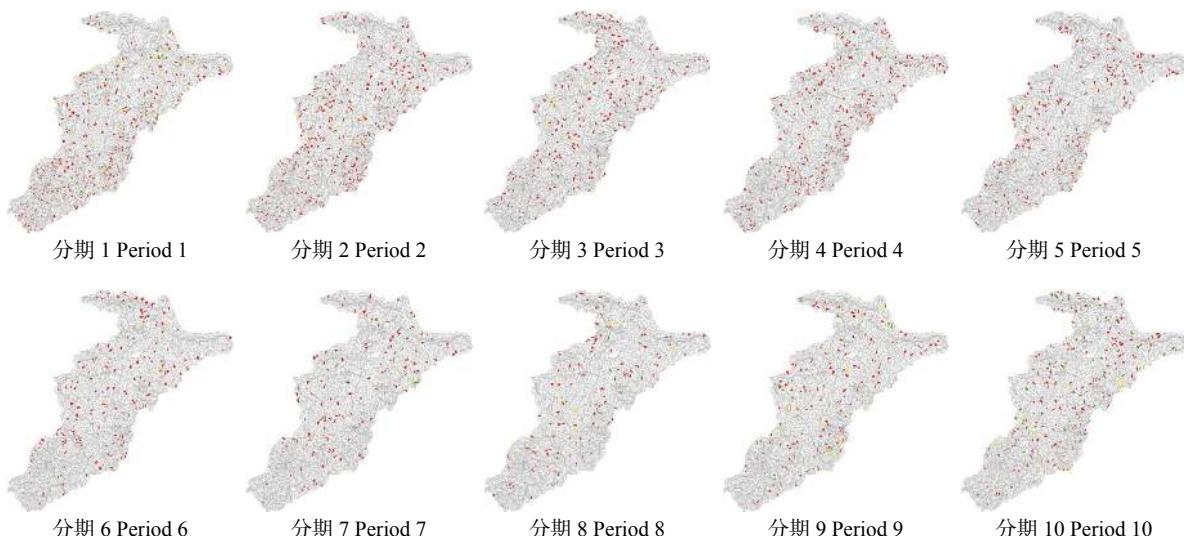
### 3.1 结论

本文以大兴安岭地区盘吉林场为例,采用模拟退火算法建立能够兼顾森林碳储量和木材生产的多目标空间规划模型。模拟结果表明:在我国当前木材和碳贸易市场的双重约束下,大兴安岭盘吉林场50年规划周期内碳汇木材复合经营经济收益可达 $1.54 \times 10^8$ 元,其中木材收益处于主导地位,约占总

表 2 各分期收获蓄积及择伐面积分布

Tab. 2 Distribution of assigned harvest volume and thinning area for each period

变量 Variable	择伐方式 Thinning method	择伐分期 Thinning period									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
收获蓄积 Harvest volume/ $10^3\text{ m}^3$	轻度择伐 Mild thinning	4.6	1.3	0.7	1.0	1.4	0.6	1.7	1.3	6.3	9.4
	中度择伐 Moderate thinning	28.1	8.9	4.6	3.2	5.4	5.2	9.4	5.0	21.5	24.1
	重度择伐 Severe thinning	198.5	218.4	177.6	210.9	169.3	135.5	102.3	127.6	132.9	159.2
	合计 Total	231.3	228.6	182.9	215.0	176.1	141.4	113.3	133.9	160.7	192.8
择伐面积/ $\text{hm}^2$ Thinning area/ha	轻度择伐 Mild thinning	474	145	86	71	132	63	133	133	461	741
	中度择伐 Moderate thinning	1 464	431	227	166	243	205	413	209	925	961
	重度择伐 Severe thinning	6 944	7 594	6 002	6 684	5 293	4 301	2 995	3 641	3 684	4 430
	合计 Total	8 882	8 170	6 315	6 921	5 668	4 569	3 541	3 983	5 070	6 132
择伐小班数量 Number of thinning subcompartment	轻度择伐 Mild thinning	16	6	3	3	5	3	4	4	15	26
	中度择伐 Moderate thinning	78	20	8	7	10	8	15	8	35	41
	重度择伐 Severe thinning	526	487	295	415	283	209	142	160	164	202
	合计 Total	620	513	306	425	298	220	161	172	214	269



绿色表示轻度择伐, 黄色表示中度择伐, 红色表示重度择伐。Green color represents mild thinning, yellow color represents moderate thinning, and red color represents severe thinning.

图 5 最优森林经营方案中各分期不同择伐作业方式空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of alternative thinning methods for each period within the optimal forest management plans

经济收益的 88.96%; 规划期内木材产量累计达  $1.78 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 碳增量达  $1.68 \times 10^6 \text{ t}$ , 期末碳储量达  $5.99 \times 10^6 \text{ t}$ , 单位面积碳储量较规划期初增加了约 38.98%; 规划期内总择伐面积达 48.01%, 结合受保护面积 (44.36%) 推算出规划期内未经营面积约占 7.63%, 其中重度择伐面积占研究区域总面积的 41.78%; 各分期内不同作业方式的配置存在显著差异, 其中重度择伐作业的蓄积收获量、采伐面积以及小班数量均最大, 平均约占各自总体的 90% 以上; 最优森林经营方案存在显著的空间分布特征, 但均符合规划模型的各项约束条件。显然, 本文提出的规划模型对我国森林碳汇经营具有重要借鉴意义。

### 3.2 讨论

为了有效缓解全球气候变化趋势, 森林碳汇经营正受到越来越多的重视。由于区域尺度森林经营规划通常涉及复杂的空间和非空间约束, 因此传统单个林分(或小班)的最优碳汇经营模式并不能完全推广到区域尺度上。因此, 本文虽在森林碳汇木材复合经营规划决策方面进行了有益探索, 但现阶段还存在一些问题有待于进一步解决:

(1) 规划模型中碳成分考虑不够周全。胡海清等<sup>[23]</sup>研究表明大兴安岭天然落叶松林和天然白桦林生态系统中非乔木层(如灌木层、草本层、凋落物层)碳储量分别占总生物碳储量的 7.57% ~ 41.06% 和 11.65% ~

51.58%，且整体随着林龄的增加呈减小趋势，说明这些成分的碳储量在森林生态系统中同样具有重要作用，但由于这些成分均存在着明显的空间异质性，很难通过模型进行定量模拟，因此现阶段还无法将其加入到规划模型中。此外，对于本文中的长期规划而言，规划期内收获的木材会随着使用年限的增加而有部分损耗，进而释放一定的  $\text{CO}_2$ ，因此后续研究中也应考虑木材碳释放过程对规划结果的影响。

(2) 规划模型中各项参数取值有待于进一步研究。为了使规划模型能够更好地应用于具体的森林实践，本文对规划模型中的部分参数进行了设置，主要包括相邻分期木材波动范围( $\alpha$ )、期末碳储量的最低增量目标( $\beta$ )、绿量约束范围( $T_m$ )以及最大连续采伐面积( $U_{\max}$ )等，但这些参数的取值均来源于国内外同行的相关研究，在我国还缺乏相关的实践经验和科学标准。Keleş 等<sup>[24]</sup>研究表明规划期内木材产量与碳增量间呈典型的非线性变化趋势，其关系可拟合为： $\text{TH} = -69.4\beta^2 + 561.8\beta + 72210 (R^2 = 0.999)$ ；Boston 等<sup>[14]</sup>研究表明：当  $U_{\max}$  为  $60 \text{ hm}^2$  时，若将绿量约束期从 3 年减小为 2 年，规划期内经济收益将增加  $10 \text{ 美元}/\text{hm}^2$ ，而当  $U_{\max}$  为  $90 \text{ hm}^2$  时，规划期内收益也可增加  $6.7 \text{ 美元}/\text{hm}^2$ ，显然这些参数取值对经营规划结果具有重要影响。因此，在实际森林经营过程中，决策者可通过设置更高的碳汇量目标(即增大  $\beta$  值)、更严格的空间约束(即减小  $U_{\max}$  而增大  $T_m$ )，来获得更符合我国实际情况的森林经营方案。

(3) 碳价格对规划结果具有显著影响。本文中碳价格采用了我国 2013—2017 年碳贸易市场的最高交易价格(120 元/t)，但该值仍显著低于当前的木材价格，因此规划模型中重度择伐的小班数量、面积及蓄积均显著高于其他作业方式。但随着全球气候的持续变化以及人们对自身生存环境的日益重视，全球及我国碳交易价格均呈现出明显的递增趋势，因此若采用更高的碳价格，则重度择伐的小班数量、面积和蓄积均会持续减小，这与 Qin 等<sup>[25]</sup>研究结果一致。Dong 等<sup>[26]</sup>研究进一步表明重度择伐面积随碳价格的增加呈明显的负 Logistic 函数关系。根据世界银行《碳价格状态及发展趋势》<sup>[27]</sup>的报告可知，碳贸易和碳税机制是当前国际社会应对全球气候变化的重要举措，但这两种机制内碳的价格却存在显著差别，其中碳贸易市场的碳价格通常低于 100 元/t，而碳税市场的碳价格则往往高于 1 000 元/t。显然，从经济角度考虑，寻找和确定合适的碳价格不仅对森林碳汇经营具有重要作用，同时也可作为森林生态效益补偿的标准。朱臻等<sup>[28]</sup>研究表明在当前木材价格处于高位的条件下，杉木人工林最佳轮伐期对

较大范围内碳价格(0~800 元/t)的变化并不敏感，但当碳价格继续上升时，杉木人工林最佳轮伐期会呈现出推迟现象；Qin 等<sup>[25]</sup>通过不同碳价格的情景模拟也表明能够使森林发挥碳汇作用的合适碳价格至少应维持在 800 元/t 以上，因此碳价格对森林经营规划效果的影响仍有待于进一步评估。但需要说明的是，碳和木材的价格比值是决定规划结果的关键，而非碳价格本身。

(4) 最后，林分生长与收获模型的预测能力与精度有待提高。为了定量模拟不同林分生长过程及其对经营措施的响应，本文采用了王鹤智<sup>[20]</sup>、董利虎<sup>[21]</sup>建立的东北林区主要林分生长与收获模型系统，但该类模型通常采用林分年龄作为核心驱动变量。在实际经营规划过程中，通常假设各小班年龄随采伐强度的增加呈线性递减趋势，因此这类模型还不能充分反映经营措施对林分年龄、结构(如树种组成)以及生长量(如蓄积)等指标的影响。如前所述，林分年龄是本文林分生长与收获模型和择伐作业约束中重要的参数之一，但限于技术原因，本文仅以森林资源二类调查数据为基准开展相关研究，规划结果可能存在一定的不确定性。因此，如何精准、快速获取主林层优势树种的平均年龄，并根据调查间隔期、进界木、采伐木和枯死木以及前后期平均胸径变化情况综合确定林分年龄是提升规划结果实际应用潜力的重要限制因素。

## 参 考 文 献

- [1] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[J]. 林业资源管理, 2014(1): 1–2.  
State Forestry Bureau. The 8th forest resources inventory results (2009–2013)[J]. Forest Resources Management, 2014(1): 1–2.
- [2] 惠刚盈, 赵中华, 袁士云. 森林经营模式评价方法: 以甘肃小陇山林区为例[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 114–120.  
Hui G Y, Zhao Z H, Yuan S Y. Evaluation method of forest management models: a case study of Xiaolongshan Forest Area in Gansu Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 114–120.
- [3] 戎建涛, 何友均. 不同森林经营模式对丹清河林场天然次生林碳贮量的影响[J]. 林业科学, 2014, 50(9): 26–35.  
Rong J T, He Y J. Effects of different forest management regimes on carbon stock in natural secondary forests at Danqinghe Forest Farm[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(9): 26–35.
- [4] 周国模. 目标规划在同龄林收获调整中的应用[J]. 北京林业大学学报, 1989, 11(4): 39–46.  
Zhou G M. An application of goal programming on even-aged forest harvesting regulation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1989, 11(4): 39–46.
- [5] 黄家荣, 杨世逸. 龙里林场多目标规划森林调整[J]. 云南林业调查规划, 1993(4): 1–10.  
Huang J R, Yang S Y. The multiobjective planning of forest resources for Youli Forest Farm[J]. Yunnan Forest Inventory and

- Planning, 1993(4): 1–10.
- [6] 于政中, 周泽海. 应用矩阵模型及线性规划进行异龄林收获调整的初步研究[J]. 林业科学, 1988, 24(3): 282–290.
- Yu Z Z, Zhou Z H. Application of matrix model and linear programming to the yield regulation of uneven-aged stands[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1988, 24(3): 282–290.
- [7] 宋铁英, 郑跃军. 异龄林收获调整的动态优化及其计算机仿真[J]. 林业科学, 1989, 25(4): 330–339.
- Song T Y, Zheng Y J. Dynamic optimization of uneven-aged forest harvesting regulations and its computer simulation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1989, 25(4): 330–339.
- [8] 刘莉, 刘国良, 陈绍志, 等. 以多功能为目标的森林模拟优化系统(FSOS)的算法与应用前景[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 3067–3072.
- Liu L, Liu G L, Chen S Z, et al. Multiple functions-targeted algorithms and potential applications of forest simulation optimization system (FSOS)[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 3067–3072.
- [9] 戎建涛, 雷相东, 张会儒, 等. 兼顾碳贮量和木材生产目标的森林经营规划研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(2): 155–162.
- Rong J T, Lei X D, Zhang H R, et al. Forest management planning incorporating values of timber and carbon[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(2): 155–162.
- [10] 李际平, 赵春燕, 袁晓红, 等. 西洞庭湖杉-阔林下植物种类及物种多样性分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(7): 49–53.
- Li J P, Zhao C Y, Yuan X H, et al. Undergrowth plant species and their diversity analysis in *Cunninghamia lanceolata* and broadleaf mixed forest in west Dongting Lake area[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(7): 49–53.
- [11] 高建云, 吴兆录, 张强, 等. 海南热带雨林次生林边缘至林内鸟类群落组成与功能集团比较[J]. *生物多样性*, 2013, 21(6): 677–687.
- Gao J Y, Wu Z L, Zhang Q, et al. Comparison of compositions and functional guilds of bird communities across an edge-interior gradient in secondary forest at Houmiling, Hainan Island, China[J]. *Biodiversity Science*, 2013, 21(6): 677–687.
- [12] Bettinger P, Boston K, Siry J P, et al. Forest management and planning[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 2017.
- [13] 董灵波, 孙云霞, 刘兆刚. 基于碳和木材目标的森林空间经营规划研究[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(1): 52–61.
- Dong L B, Sun Y X, Liu Z G. Integrating carbon and timber objective into forest spatial planning management[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(1): 52–61.
- [14] Boston K, Bettinger P. The economic impact of green-up constraints in the southeastern United States[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 145(3): 191–202.
- [15] Bettinger P, Boston K. Habitat and commodity production trade-offs in coastal Oregon[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2008, 42(2): 112–128.
- [16] Baskent E Z, Keleş S. Developing alternative forest management planning strategies incorporating timber, water and carbon values: an examination of their interactions[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2009, 14(4): 467–480.
- [17] 陈伯望, Von Gadow K, Vilko F, et al. 德国北部挪威云杉林可持续经营中期计划的实例分析[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(5): 541–546.
- Chen B W, Von Gadow K, Vilko F, et al. A case study in planning for sustainable forest medium-term management of Norway spruce from Northern Germany[J]. *Forest Research*, 2006, 19(5): 541–546.
- [18] 陈伯望, Von Gadow K. 德国北部挪威云杉林可持续经营计划中空间目标的优化[J]. *林业科学研究*, 2008, 21(3): 279–288.
- Chen B W, Von Gadow K. Optimization of spatial objectives in planning for sustainable forest medium-term management of Norway spruce from northern Germany[J]. *Forest Research*, 2008, 21(3): 279–288.
- [19] 董灵波, 孙云霞, 刘兆刚. 基于模拟退火算法的森林空间经营规划[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(1): 133–140.
- Dong L B, Sun Y X, Liu Z G. Spatial forest-management planning with simulated annealing algorithm[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2018, 42(1): 133–140.
- [20] 王鹤智. 东北林区林分生长动态模拟系统的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- Wang H Z. Dynamic simulating system for stand growth of forests in Northeast China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [21] 董利虎. 东北林区主要树种及林分类型生物量模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- Dong L H. Developing individual and stand-level biomass equations in northeast China forest area[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [22] Murray A T. Spatial restrictions in harvest scheduling[J]. *Forest Science*, 1999, 45(1): 45–52.
- [23] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 大兴安岭5种典型林型森林生物碳储量[J]. *生态学报*, 2015, 35(17): 5745–5760.
- Hu H Q, Luo B Z, Wei S J, et al. Estimating biological carbon storage of five typical forest types in the Daxing'anling Mountains, Heilongjiang, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17): 5745–5760.
- [24] Keleş S, Başkent E Z. Modelling and analyzing timber production and carbon sequestration values of forest ecosystems: a case study[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2007, 16(3): 473–479.
- [25] Qin H Y, Dong L B, Huang Y L. Evaluating the effects of carbon prices on trade-offs between carbon and timber management objectives in forest spatial harvest scheduling problems: a case study from Northeast China[J]. *Forests*, 2017, 8(2): 43.
- [26] Dong L B, Lu W, Liu Z G. Developing alternative forest spatial management plans when carbon and timber values are considered: a real case from northeastern China[J]. *Ecological Modelling*, 2018, 385: 45–57.
- [27] World Bank, Ecofys. State and trends of carbon pricing[R]. Washington: World Bank, 2015.
- [28] 朱臻, 沈月琴, 张耀启, 等. 碳汇经营目标下的林地期望价值变化及碳供给: 基于杉木裸地造林假设研究[J]. *林业科学*, 2012, 48(11): 112–116.
- Zhu Z, Shen Y Q, Zhang Y Q, et al. Change of forestland expected value and carbon supply in the objective of carbon sequestration: based on the Chinese fir plantation in bared land[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(11): 112–116.

(责任编辑 冯秀兰  
责任编委 张会儒)