

# 树木碳储量的计算分析及最佳轮伐期的确定

罗常浩, 黄甫坚, 韩天宇, 王洋, 娄钦\*

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年9月26日; 录用日期: 2022年11月2日; 发布日期: 2022年11月10日

## 摘要

本文以黄杉、刺槐和落叶松三种树种为例, 通过生物量转换因子法探究碳储量与树龄之间的关系。结果表明对于所研究的三种树种的碳储量都随树龄的增长而增加, 但碳储存的生长速率并不总是增加的。表明不同树种和不同地区之间的碳储存量和生长速率的变化趋势基本一致, 且存在碳储量因素下的最佳轮伐期。为了确定森林的最近轮伐期, 分别考虑了两种情况, 一种情况为仅考虑经济因素时, 可通过林地净现值模型树木的最佳轮伐期。另一种情况为综合考虑碳封存效益和经济效益时可通过归一化处理确定每个树种的最佳轮伐期。结果表明: 当经济的权重较高时, 最佳轮伐期会变小; 当固碳效益的权重较高时, 则反之。该工作可为实际森林的最佳轮伐期预测提供理论指导。

## 关键词

生物量转换因子法, 林地净现值, 最佳轮伐期, 归一化

# Calculation Analysis of Tree Carbon Stock and Determination of Optimal Rotation Period

Changhao Luo, Fujian Huang, Taiyu Han, Yang Wang, Qin Lou\*

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Sep. 26<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2022; published: Nov. 10<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In this work, the relationship between carbon storage and tree age is explored by the biomass

\*通讯作者。

conversion factor method, taking three species of tree species, namely, yellow cedar, black locust, and larch, as examples. The findings reveal that the carbon storage of the three species increases with the growth of tree age, but the growth rate of carbon storage does not always increase. Furthermore, the results also show that the change trends of carbon storage as well as growth rate among different tree species and regions are essentially consistent, and there is an optimal rotation period when the carbon storage factor is considered. In order to determine the optimal rotation period of the forest, two cases are considered respectively. One case is that when only economic factors are considered, the optimal rotation period of trees can be determined through the forest net present value model. The other case is that when the carbon sequestration benefits and economic benefits are fully considered, the best rotation period of each tree species can be determined through normalization. The results showed that when the economic weight is higher, the optimal rotation period should be shorter; When the weight of carbon sequestration benefit is high, the opposite is true. This research can be used to provide theoretical guidance for predicting the optimal rotation period of actual forests.

## Keywords

Biomass Expansion Factor Method, Forest Land NPV, Optimal Rotation Period, Normalization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地球是人类不可替代的宝贵家园，由于二氧化碳过度排放导致全球气候变化的影响正对全人类的生存和发展构成日益严重的挑战[1]。气候变化的极端影响是全球性的，能否避免极端气候的负面影响，取决于我们现在和未来的选择。作为一个负责任的大国和温室气体的主要排放者，中国一直致力于减少二氧化碳等温室气体的排放，减缓全球气候变暖，例如采用新型清洁能源、二氧化碳捕集封存利用与封存等[2] [3]。作为应对全球气候变化的一项重要措施，通过森林进行碳封存具有多重效益和较低的成本以及经济可行性的优势。一方面二氧化碳可以通过生物或机械手段以生物质的形式固定在植物、土壤或水中。另一方面，森林资源也为人类提供了重要的经济和社会效益。

我国政府为了改善生态环境和气候变化，实施了一系列植树造林和森林保护措施，如退耕还林、沙源治理、天然林资源保护等，使得中国森林的覆盖率逐年增长。当前我国在森林覆盖面积方面虽然取得了一定的成绩，然而，森林的可持续经营和林业的可持续发展方面还存在一定的不足，如森林的轮伐期(轮伐期是指轮流伐尽经营类型内各林分后再次回到最初伐区采伐成熟林的生产周期，包括采伐、更新、培育成林到再次采伐周而复始的整个时期)如何决定才能保证生态和经济的最优化[4]。过去，杉木人工林轮伐期的研究注重数量成熟和经济效益，随着森林经营理念的转变，固碳增汇和维持长期立地生产力成为其重要任务，科学的经营管理是人工林碳汇提升的主要途径[5]。目前，一部分人认为，通过森林固存二氧化碳不应该砍伐森林。另一部分人认为，从经济因素和碳封存的角度来看，适度砍伐森林是一个更好的解决方案[6] [7] [8]。因此，讨论如何管理森林以获得人类最大的利益，是我们的一项紧迫工作[9] [10] [11] [12]。

为了解决上述问题，本文将以前森林中常见的三种树木，如黄杉、刺槐和落叶松为例建立预测和决策

的数学模型，致力于确定森林及其产品在一段时间内可封存多少二氧化碳量以及可产生的经济效益，以确定森林的最佳轮伐期。

## 2. 模型

### 2.1. 碳储量计算模型

森林碳储量指从大气中固着的、现在储存在森林生态系统中的碳量，主要包括地上生物量、地下生物量、废弃物、枯木和土壤有机物中的碳量[13]。森林碳储量的准确估计是森林碳汇和碳循环问题的基础[14]。适用于预测森林碳储量的方法很多，如样地清查法、微气象法、箱体法、模型模拟法、遥感估算法等[14]。其中，生物量转换因子法被认为是估算森林生物量的较好方法之一[15]，它以林分生物量与木材体积比的平均值为转换因子，根据森林清查得到的森林储量计算森林碳储量，非常适用于全国范围内的森林生物量预测[16]。因此，本文将采用生物量转换因子法来计算森林碳储量[13] [17]。

地上生物量是指位于土壤层以上的树木所有部分的生物量，包括树枝、树皮、种子和叶子，以干重表示。地上部分的总生物量  $W_T$  为：

$$W_T = A_i \cdot W_{ij} = A_i \cdot V_{ij} \cdot BEF_{ij} \cdot SVD_{ij} \quad (1)$$

其中： $A_i$  是森林类型  $i$  的面积； $W_{ij}$  为森林类型  $i$  的树种  $j$  的单位面积生物量； $V_{ij}$  是森林类型  $i$  的树种  $j$  每公顷的蓄积量； $BEF_{ij}$  是森林类型  $i$  的树种  $j$  的生物量扩展系数； $SVD_{ij}$  是森林类型  $i$  的树种  $j$  的木材密度； $n$  是森林类型的总数量； $m$  是树种的数量

地下生物量  $W_R$  是指所有地下部分的碳储量，是基于地上部分的碳储量的转换。

$$W_R = W_T \cdot R \quad (2)$$

其中  $R$  是根茎比，通过计算地上和地下生物量以及平均碳含量率，可以得出平均碳储量：

$$C = W \cdot CF \quad (3)$$

其中  $CF$  是树种的平均碳含量。

当考虑到有  $i$  个树种时，总碳储量的计算公式为：

$$C = \sum_{i=1}^n A \cdot V \cdot BEF_i \cdot SVD_i \cdot (1 + R_i) \cdot CF \quad (4)$$

一个二氧化碳分子由一个碳原子和两个氧原子组成，植物中的碳含量可以用相对原子质量换算成植物已经吸收的二氧化碳的质量。具体方法如下：

碳原子的相对原子质量是 12.0107，氧原子的相对原子质量是 15.9994，那么二氧化碳的相对分子质量是  $C + O \times 2 = 44.0095$ ，二氧化碳含量与碳含量的比率是  $k = 44.0095/12.0107 = 3.6642$ ，通过计算植物中的碳含量，可以计算出植物生长过程中固定的二氧化碳量： $CO_2 = C \times k$  [18]。

### 2.2. 林地净现值模型

NPV 模型可以表示为一块林地在无限轮伐期下的木材和非木材价值的净现值之和，非木材价值来源于森林的供水，碳汇服务，保护生物多样性和一些非木材产品如新鲜水果等，本文仅考虑非木材价值中的碳汇价值[19]。林地的净现值与轮伐周期密切相关，当木材处于最佳轮伐期时，该值最大，此时林地的净现值也称为林地价格。无轮伐期条件下林地的净现值表达式如下[20]：

$$NPV^\infty = NPV_t + NPV_c = \frac{P_t Q(t) e^{-rt} + \int_0^t P_c Q'(t) e^{-rt} dt - C}{1 - e^{-rt}} \quad (5)$$

$$NPV_t = \delta PQ(t)e^{-rt} - C = \frac{\delta(P_t - C_h)Q(t)e^{-rt} - C_f - \frac{C_m(1-e^{-rt})}{1-e^{-r}}}{1-e^{-r}} \quad (6)$$

$$NPV_c = \frac{\int_0^t \lambda P_c Q'(t)e^{-rt} dt - P_c(1-\alpha)R \cdot e^{-rt}}{1-e^{-r}} \quad (7)$$

其中  $NPV^\infty$  为无限轮伐周期下林地的净现值； $NPV_t$  为木材效益的净现值； $NPV_c$  为碳汇效益的净现值； $P_t$  和  $P_c$  分别为木材价格和碳价格； $Q(t)$  是树木年龄为  $t$  年单位面积存储量， $Q'(t)$  是  $Q(t)$  的导数，表示年积累增长函数； $C$  为碳汇项目投入成本总量，包括创建成本、计量监测成本、管理成本等； $r$  为连续贴现率； $\lambda$  是碳转化因子，由基本木材密度、生物量膨胀因子和生物量碳含量相乘得到。该值由基本木材密度、生物量膨胀因子和生物量碳含量的乘积得到； $R$  是轮伐结束时林分单位面积的碳含量。这是单位库存  $Q(t)$  和碳转化系统  $\lambda$  的乘积； $\alpha$  是碳长期固定在木制品中的比例，被看作是木制品衰变率的函数。当  $\alpha = 0$  时，木制品中的所有碳在收获时通过燃烧和其他方式瞬间释放到大气中；当  $\alpha = 1$  时，木材采伐后转移的所有碳都长时间储存在木制品中，不会由于腐烂而不释放。碳汇项目投入的总成本可简化为：

$$C = \omega \cdot E \quad (8)$$

其中  $\omega$  为单位人工成本，即人工日价格； $E$  为人工投入总功率投入总量

$$W(t) = \beta * R * e^{-v_1(t-T)} + (1-\beta) * R * e^{-v_2(t-T)} \quad (9)$$

$$W(t)' = -\beta * R * v_1 * e^{-v_1(t-T)} - (1-\beta) * R * v_2 * e^{-v_2(t-T)} \quad (10)$$

其中  $W(t)$  为木制品中的碳含量， $W(t)$  的导数  $W(t)'$  为木制品的碳释放率； $t$  为树的年龄； $T$  为轮伐周期； $(t-T)$  为林木采伐后的时间； $v$  为耐久木制品的衰减率；

可以求得采伐后长期固定碳的比例  $\alpha$

$$\alpha = 1 - \frac{v}{v+r} \quad (11)$$

不同生长年  $t$  的林地净现值不同。林地的净现值只有在固碳量最高的树木被砍伐时才达到最大，林地的最大净现值如下：

$$NPV^\infty = \max(NPV_t + NPV_c) \quad (12)$$

### 3. 实验与结果分析

#### 3.1. 碳储量的计算

上述模型通过中国科学院地理科学与资源研究所 2004~2014 年中国森林生态系统碳密度数据集进行了验证。图 1 显示了数据的地理分布，蓝色代表天然人工林，红色代表人工林，圆圈的大小代表树木的年龄。

为了使模型具有通用性和鲁棒性，本实验从上述数据库中人为地选择了三种不同气候带下的阔叶林和针叶林，分别是亚热带的黄杉、温带的刺槐和寒温带的落叶松，作为探究碳封存与经济效益评估的实验树种。三种树木的地上生物量和地下生物量的地理和生物信息如表 1 所示。



Figure 1. Geographical distribution of test data  
图 1. 数据地理分布情况

Table 1. Geographical and biological information on three species of trees  
表 1. 三种树种的地理和生物信息

种类	气候带	BEF	R
黄杉	亚热带	1.3	0.29
落叶松	寒温带	1.35	0.3
刺槐	温带	1.4	0.2

相应生物量遵循以下公式：

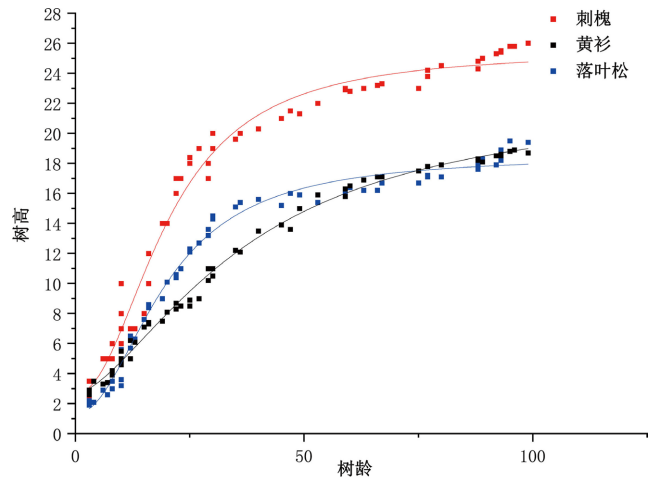
$$W = a(D^2H)^b \tag{13}$$

式中  $D$  和  $H$  分别代表胸径和树高，胸径是指树的主干在离地表胸高处的直径，当截面变形时，测量最大和最小值的平均值，而树高指树木从地面上根茎到树梢之间的距离或高度，是表示树木高矮的调查因子。 $a$ 、 $b$  为不同条件下的相应系数，具体如表 2 所示，其中  $W_S$  代表树干生物量， $W_B$  代表树枝生物量， $W_L$  代表叶子生物量， $W_T$  代表地上总生物量，表达式为  $W_T = W_S + W_B + W_L$ ， $W_R$  代表地下生物量， $W$  代表全树总生物量。

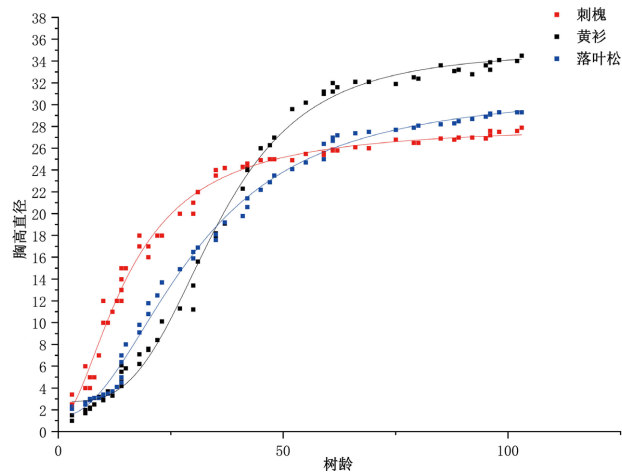
Table 2. Three tree formula coefficients  
表 2. 三种树种的公式系数

	黄杉		落叶松		刺槐	
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$
$W_S$	0.0163	0.9958	0.0460	0.8722	0.0552	0.8576
$W_B$	0.0028	1.0036	0.0356	0.5624	0.0242	0.7908
$W_L$	0.0058	0.8890	0.0139	0.5628	0.0545	0.4574
$W$	0.0436	0.6464	0.0075	0.9725	0.1145	0.6328

从文献中[21] [22]提取数据通过 origin 软件并用 Hill 函数以及 Levenberg-Marquardt 优化算法进行拟合，并在拟合的线性、二次、对数、幂函数、指数和逻辑增长方程中进行测试。如果决定系数越大，拟合效果就越好，应用这一原则最终拟合的最佳曲线如图 2 和图 3。



**Figure 2.** Relationship between height and age of three tree species  
**图 2.** 三种树种高度和年龄之间的关系



**Figure 3.** Relationship between diameter at breast height and age of three tree species  
**图 3.** 三种树种胸高直径与年龄的关系

对刺槐、黄杉和落叶松的胸高  $D$  和树高  $H$  分别拟合了以下三组方程(用下标 Y 代表黄杉, L 代表落叶松, R 代表刺槐):

$$\begin{aligned}
 D_R &= 0.90 + (28.08 - 0.90) \frac{t^{1.82}}{15.70^{1.82} - t^{1.82}} \\
 H_R &= 2.67 + (25.47 - 2.67) \frac{t^{2.13}}{20.06^{2.13} - t^{2.13}} \\
 D_Y &= 1.36 + (31.42 - 1.366) \frac{t^{2.14}}{30.16^{2.14} - t^{2.14}} \\
 H_Y &= 2.65 + (22.42 - 2.65) \frac{t^{1.59}}{37.36^{1.59} - t^{1.59}} \\
 D_L &= 2.74 + (34.95 - 2.74) \frac{t^{3.43}}{35.19^{3.43} - t^{3.43}} \\
 H_L &= 1.32 + (18.50 - 1.32) \frac{t^{2.08}}{19.72^{2.08} - t^{2.08}}
 \end{aligned} \tag{14}$$

根据公式(14)中生物量  $W$  与胸高  $H$  直径的关系, 生物量  $W$  与树高  $H$  的关系, 胸高直径与树龄的关系, 可以直接求出生物量与树龄的关系, 然后引入公式(4)后, 可以导出碳储存之间的关系, 作为树龄的函数。图 4 为得到的碳储量变化随树龄增加的关系, 图 5 为图 4 的函数的一阶导数, 表示碳储量生长速率随树龄增加的变化。

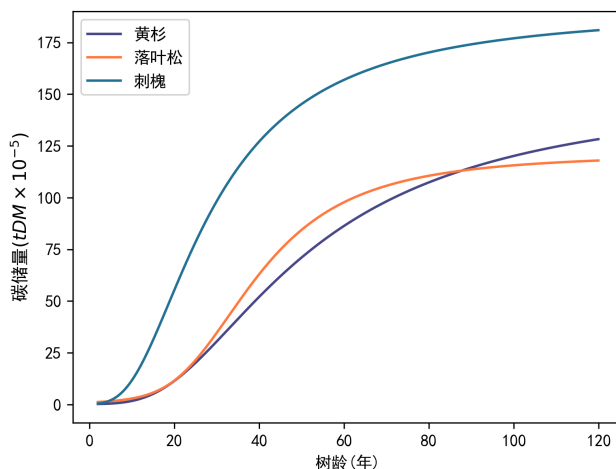


Figure 4. Carbon storage  
图 4. 碳储存

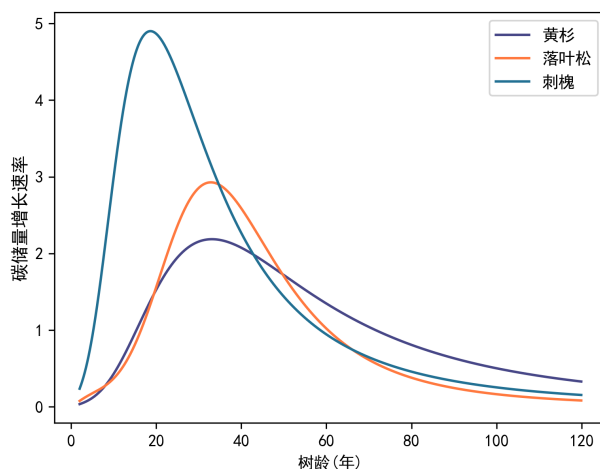


Figure 5. Carbon storage growth rate  
图 5. 碳储存量增长率

从图 4 的结果可以发现树木的碳储量随年龄的增长而增加先快速增加然后再缓慢增加。对应的碳储存的生长速率并不总是增加的, 但首先经历了一个相对较快的上升阶段, 在达到峰值后, 生长速率开始下降(如图 5 所示), 这在图 4 中反映为“S”曲线。此外, 从图 4 和图 5 的结果还可以发现黄杉、刺槐和落叶松这三种树种的碳储量的变化趋势一致, 表明不同树种和不同地区之间的碳储存量和生长速率差异不大, 且与树木本身的性质有关。

综合图 4 和图 5 的结果可知, 当树木的碳存储增长率从峰值降到 1 以下后, 其碳储量变化非常缓慢, 可以近似的认为这个时候碳储量达到了最大值。通过对图 5 中得到的点的分析表明, 刺槐 58 岁、落叶松 60 岁、黄杉 71 岁时的碳储存增长率为 1, 这三个树龄对于该树种的碳储量最大。图 4 的结果还表明刺槐的碳储存曲线同时高于其余两条曲线, 这表明刺槐可以同时存储更多的二氧化碳。在只考虑固碳量

的条件下, 王伟峰等的研究运用 FORECAST 模型[23], 讨论了短轮伐期(15 年)、正常轮伐期(25 年)以及长轮伐期(50 年)三种情况的杉木的固定碳含量。计算得出三种轮伐期在同一个时间跨度(150 年)总固碳含量存在差异, 采用长轮伐期收获方式的总生物量碳分别是正常轮伐期的 0.63 倍和短轮伐期的 0.65 倍, 虽然在长时间内采用短轮伐期, 固碳含量较多, 但是由于而采用短轮伐期模式的地力衰退程度要高于长轮伐期, 这表明在生产实践中追求短轮伐期的收获方式是不可持续的。正常轮伐期和长轮伐期的总固碳量低于短轮伐期, 但长轮伐期固碳持久性更强, 有利于维持每个轮伐期内固碳量的稳定。该结论与本文得出的对固定碳而言的最佳轮伐期基本吻合。

### 3.2. 林地净现值的计算

以上分析没有考虑经济因素, 当考虑到经济因素时, 将具体数据引入上述林地净现值模型, 可得到林地净现值随树龄变化的趋势。具体如下: 根据前人的研究数据[24] [25] [26], 黄杉的出材率为 0.88, 落叶松为 0.92, 刺槐为 0.78。三种树种的木材腐烂率分别为: 0.05, 0.002, 0.01; 碳价为 11.6 美元; 运输成本为 10.7 美元; 折扣率为 0.05。三种树木的价格如下: 黄杉每吨 161.5 美元, 落叶松每吨 140.6 美元, 刺槐每吨 285.3 美元。从上述数据中可以得到三个树种的总成本如下: 黄杉的总成本是  $8500 + 850 \times t$ ; 落叶松的总成本是  $7500 + 750 \times t$ ; 刺槐的总成本是  $9500 + 950 \times t$ 。将这些数据代入林地净现值模型, 得到林地净现值随树龄变化的趋势如图 6。根据图中结果可知, 导数为零的点所对应的树龄就是最佳轮伐期所对应的年份, 也就是林地净现值最大时对应的最佳轮伐期, 这样就得到了考虑森林经济的森林经营方案。对应最佳砍伐期分别为黄杉 21 年、落叶松 26 年、刺槐 20 年, 同时可以得到刺槐的经济效益最好。本文探究了在考虑林地净现值即碳汇收益时的最佳轮伐期, 根据余智涵、宁卓等人的研究[27], 以南方各省份杉木人工林为研究对象, 对不同情境下林地期望价值的净现值通过蒙特卡洛模拟进行了建模计算, 最后得到了不同情境下的林地净现值以及最佳轮伐期, 大约在 20~30 年之间, 与本文建模得出对应结果基本接近, 这样的措施刺激了碳汇营林项目的增加, 进而提高了森林的生态效益, 有利于碳中和愿景的实现。

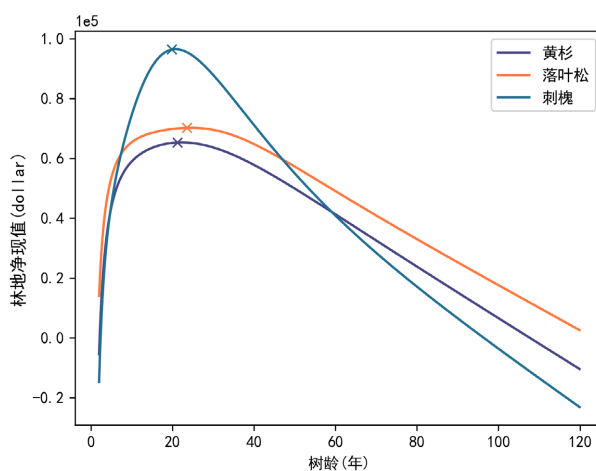


Figure 6. NPV versus tree age change curve

图 6. 净现值与树龄变化曲线

### 3.3. 综合考虑碳储量和经济效益时的最佳轮伐期

当综合考虑多个因素时, 以经济效益和固碳效益为例。首先, 将碳储量的增长率归一化, 以最大速率与平均速率之差为最大值, 用各年龄段的速率与最大值之差除以最大值, 得到碳储量随年龄增长的归一化增长率, 这可以作为碳储量随年龄增长的优劣程度, 结果越大, 对碳储量越好。



再将考虑经济因素的效果归一化，用所有的经济曲线除以最大值，得到归一化后的经济随树龄的变化，这可以作为经济随树龄增加的优劣程度，结果越大，经济效益越好。这两个权重乘以相应的归一化数据，相加得到一个综合评价系数。当这个评价因子为最大时，就可以得到结合这两个因素的最佳轮伐期。

本文选择了碳封存权重和经济权重分别为 75% 和 25%，50% 和 25%，以及 25% 和 75%。对于这三种不同的情况的结果分别展示在图 7(a)、图 7(b)、图 7(c) 中。

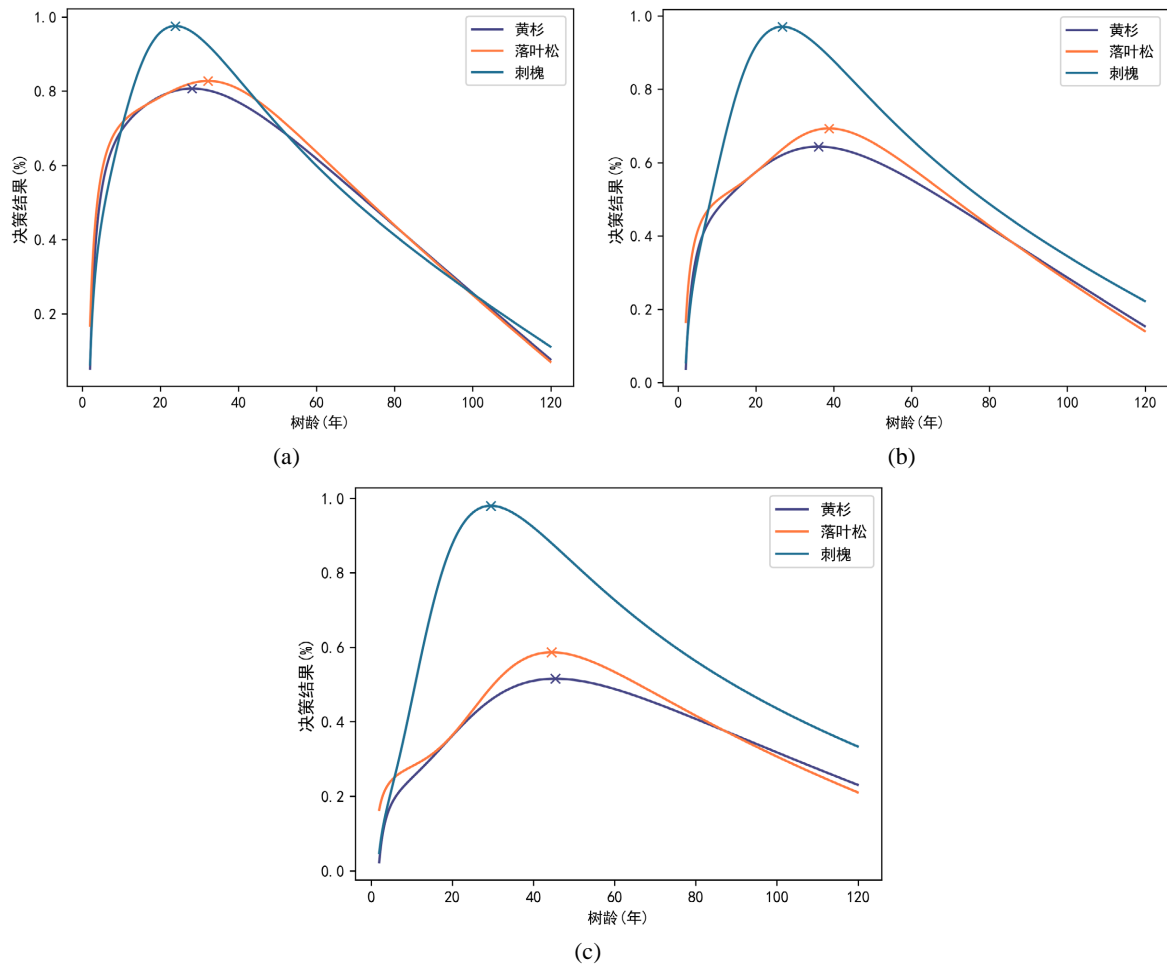


Figure 7. Normalized curves under weights. (a) 75%; (b) 50%; (c) 25%  
图 7. 不同权重下的归一化曲线。(a) 75%；(b) 50%；(c) 25%

从图 7(a) 结果可知，刺槐、黄杉和落叶松的最佳轮伐期分别为 31、45 和 44 年的结论；对于图 7(b) 曲线，三者的最佳轮伐期分别为 30、36 和 38 年；而对于图 7(c) 曲线，三者的最佳轮伐期分别为 28、30 和 32 年。以上结果表明：当经济考虑的权重较高时，曲线的最高点会向左移动，最佳轮伐期会变小。当固碳效益的权重较高时，曲线的最高点会向右移动，最佳轮伐期会变大。也就是说，当需要森林的经济效益较高时，可以提前轮伐期，当需要保护自然和固碳时，需要延长轮伐期。本文探究了综合考虑固碳量和林地净现值的最佳轮伐期，董灵波、等人针对当前人工林经营重木材收益、轻碳汇效益的问题，探究了兼顾碳汇和木材生产的人工林最优轮伐期[9]，为人工林多目标经营提供理论依据。以白落叶松人工林为研究对象，Faustmann-Hartman 模型为基础构建模型，探究出了不同情景下的林地净现值以及碳储量、

最优轮伐期，其最佳轮伐期在 35 年左右。这与本文建模提出的最佳轮伐期基本保持一致，且各参数趋势一致，再一次应证了模型的准确性。

最佳轮伐期与权重大小的曲线如图 8 所示。这张图的趋势更直观地表明，当选择经济效益时，需要较短的轮伐期，这也会导致树木的碳封存量减少，而当选择更多的碳封存时，需要较长的轮伐期。

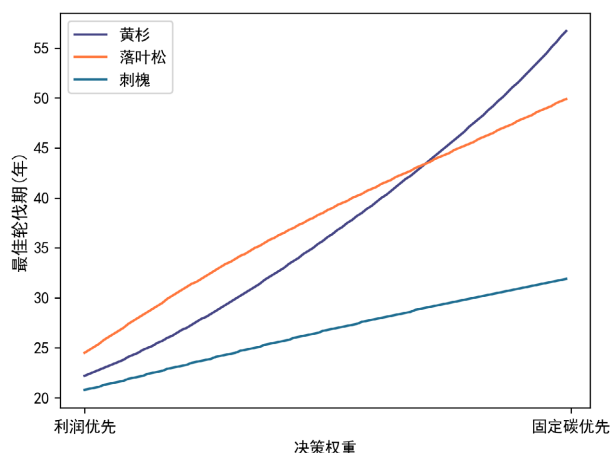


Figure 8. Curve of optimal rotation period with weight size  
图 8. 最佳轮伐周期与权重大小的曲线

对数据的审查表明，在有效数据中，碳储量和经济具有同等的重要性，权重为 50%，这响应了全球提出的低碳环保的高质量生活。扩展到一般情况下，当考虑更多因素时，可以对树龄变化的因素进行类似的归一化处理，然后找到不同因素之间的重要性权重，这些权重可以从数据中得到，也可以从相关文献中找到。最后，对每个因子的归一化评价因子进行加权求和，找到评价因子的最大点，并找到相应的树龄，这就是最佳轮伐期。

当然，在考虑树龄的区间范围时，由于增加速率的时间段在最大速率点之前，这个时期是树木从幼年到成年的时期，所以在这个时间段的树龄条件下，设定为轮伐期是不合理的，选择这个树龄之后的区间进行讨论。

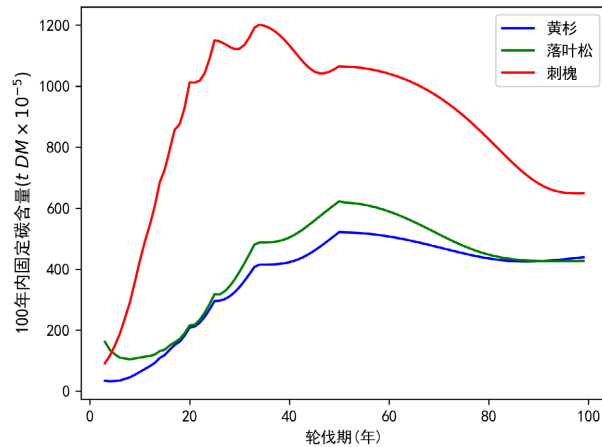
### 3.4. 轮伐期对碳封存量及林地净现值的影响

树木的年龄多数为一百年之间，故在后续探究轮伐期对碳封存量及林地净现值的影响时，以 100 年为例进行计算，得到不同轮伐期情况下 100 年的碳封存量从而分析得到轮伐期对其的影响。为了通过计算得到轮伐期对固碳量的影响，按照第一个碳储量计算建立的模型可以分析得到三种树的固碳量，然后通过固碳量与二氧化碳吸收量的转换关系得到了二氧化碳固碳量与树龄之间的关系。随着轮伐期的变化，100 年内森林及其产品的二氧化碳固存量也会发生变化。显然不同轮伐期条件下的二氧化碳封存量可以建立关系式计算如下(以下计算中已将碳封存量转换为二氧化碳封存量)。

$$S = \left[ \frac{100}{P} \right] \times Seq(t) + Seq(t) \left( 100 - \left[ \frac{100}{P} \right] \times P \right) \quad (15)$$

在上述公式中，轮伐期为  $P$ ，总的二氧化碳封存量为  $S$ ，树木生长到树龄  $t$  时的二氧化碳封存量为  $Seq(t)$ ， $\left[ \frac{100}{P} \right]$  代表 100 除以  $P$  的值，四舍五入到最近的整数。图 9 给出了二氧化碳封存量与轮伐期的关系。从

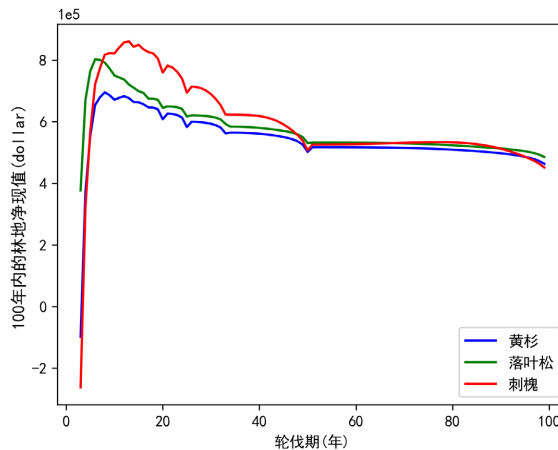
图 9 可以发现随着砍伐周期的增加，碳储量并没有一直增加，而是先增加后减小，说明其存在最佳轮伐期。轮伐期的选择决定着碳封存量的多少，且并非正比关系。



**Figure 9.** Relationship curve between CO<sub>2</sub> sequestration and rotation period  
**图 9.** 二氧化碳封存与轮伐期的关系曲线

为了计算 100 年的二氧化碳封存量，100 年内不进行采伐，这相当于 100 年的轮伐期。当轮伐期为 100 年时，三种树木的二氧化碳封存量为：刺槐  $654 \times 10^{-5}$  (tDM)，落叶松  $425 \times 10^{-5}$  (tDM)，黄杉  $431 \times 10^{-5}$  (tDM)。当使用本文计算得出的碳封存权重和经济权重均为 50% 的最佳轮伐期时，P 分别等于 30 年、36 年和 38 年，在这种情况下，刺槐的二氧化碳封存量为  $1113 \times 10^{-5}$  (tDM)，落叶松为  $533 \times 10^{-5}$  (tDM)，黄杉为  $521 \times 10^{-5}$  (tDM)。很明显，在这个轮伐期下的碳固存量比没有任何措施的情况下要大。

用同样的方法，可以得到林地净现值与轮伐期之间的函数关系图，如图 10 所示。



**Figure 10.** Relationship curve between NPV and rotation period  
**图 10.** 净现值与轮伐期的关系曲线

在不采取任何措施的情况下，100 年的林分净现值为：落叶松  $5.09 \times 10^5$ ，黄杉  $4.86 \times 10^5$ ，刺槐  $4.83 \times 10^5$ ；而采用最佳轮伐期的林分净现值为：落叶松  $7.12 \times 10^5$ ，黄杉  $6.09 \times 10^5$ ，刺槐  $6.35 \times 10^5$ 。有轮伐期的林分的净现值比没有轮伐期的林分的净现值要大。

#### 4. 结论

本文通过建立数学模型研究了树龄对森林碳储量和林地净现值的影响，得到的结果如下：

- 1) 当不考虑经济因素时，可以得到不同树龄的最佳砍伐时间：刺槐 58 年；落叶松 60 年；黄杉 71 年。达到最佳的砍伐期后种植新的树木可以储存的碳量更多。

2) 不同树种的碳储量随树龄的变化趋势基本一致, 然而, 相同条件下, 刺槐的碳储量高于黄杉和落叶松, 因此到达新的轮伐期后可以把碳储量低的树木改成碳储量高的树木使得森林在相同的时间储存更多的 CO<sub>2</sub>。

3) 当考虑到经济因素时, 森林树木的最佳轮伐期与碳储量和经济因素的权重系数直接相关。一般而言, 碳储量的权重越大, 轮伐期越长。当碳储量和经济因素权重相当时, 刺槐、黄杉和落叶松的最佳轮伐期分别是 30 年、36 年、38 年。

受数据来源的限制, 本实验只探讨了三个树种的数据, 但本实验所采用的小样本研究涵盖了不同气候区、不同属种的树种数据, 具有较高的普适性, 可以在全国的亚热带、温带、寒温带地区使用, 并可以推广到所有树种。

## 参考文献

- [1] 何诗霏. 中国二氧化碳排放步入缓慢增长期[N/OL]. 国际商报, 2022-08-17(004).  
<https://doi.org/10.28270/n.cnki.ngjsb.2022.003208>
- [2] 赵敏娟, 石锐, 姚柳杨. 中国农业碳中和目标分析与实现路径[J/OL]. 农业经济问题, 2022(9): 24-34.  
<https://doi.org/10.13246/j.cnki.iae.20220913.002>, 2022-09-21.
- [3] 陈燕和. 我国省域碳排放绩效差异及影响因素研究——基于非期望产出的 SBM 模型及 Malmquist 指数分解[J]. 海南金融, 2022(9): 42-57.
- [4] 赵晓敏. 我国人工林生态轮伐期探讨[J]. 现代园艺, 2017(19): 94-95.  
<https://doi.org/10.14051/j.cnki.xdyy.2017.19.055>
- [5] 余智涵, 宁卓, 杨红强. 随机价格下杉木人工林的碳汇收益及最优轮伐期确定[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 753-768.
- [6] 令狐大智, 罗溪, 朱帮助. 森林碳汇测算及固碳影响因素研究进展[J]. 广西大学学报(哲学社会科学版), 2022, 44(3): 142-155.
- [7] 农业农村部农业贸易促进中心研究所, 中国农业科学院农业信息研究所国际情报研究室. 提高森林监测能力, 释放森林储碳潜力[J]. 世界农业, 2019, 477(1): 144.
- [8] 霍九龙. 植树造林在全球气候变暖中的作用及其对策[J]. 农业与技术, 2015, 35(18): 99.
- [9] 董灵波, 藺雪莹, 张一帆, 刘兆刚. 兼顾碳汇和木材生产的长白落叶松人工林最优轮伐期[J]. 林业科学, 2022, 58(5): 18-30.
- [10] 黄祥丰, 陈邦清, 伍遇普, 梅花, 鲁光荣. 我国杨树速生丰产林合理轮伐期研究概况[J]. 林业科技通讯, 2021(5): 49-56. <https://doi.org/10.13456/j.cnki.lykt.2020.06.01.0005>
- [11] 卢婵江, 周晓果, 黄冰川, 温远光, 朱宏光, 莫继有, 左花, 严理, 兰俊. 不同轮伐期巨尾桉人工林的经济效益分析[J]. 广西科学, 2018, 25(2): 158-162. <https://doi.org/10.13656/j.cnki.gxkx.20180427.004>
- [12] 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[J]. 经济研究, 2021, 56(12): 187-202.
- [13] 朱建华, 张小全, 等. LY/T 2253-2014. 造林项目碳汇计量和监测指南[S]. 北京: 国家林业局, 2014.
- [14] 续珊珊. 森林碳储量估算方法综述[J]. 林业调查规划, 2014, 39(6): 28-33.  
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-3168.2014.06.007>
- [15] 黄兴召, 王泽夫, 徐小牛. 生物量转换因子连续函数的拟合方法比较[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(5): 775-781.
- [16] 胡砚秋, 苏志尧, 李佩瑗, 等. 林分生物量碳计量模型的比较研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(1): 84-88. <https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.01.016>
- [17] 郑芊卉, 韦海航, 陈健, 侯瑞萍, 周春国. 三北工程四十年碳汇价值评价研究[J]. 林业经济, 2019, 41(2): 67-73+112. <https://doi.org/10.13843/j.cnki.lyjj.2019.02.012>
- [18] Fransen, B. (2019) How to Calculate CO<sub>2</sub> Sequestration. EcoMatcher.
- [19] 黄宰胜, 陈钦. 基于造林成本法的林业碳汇成本收益影响因素分析[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 485-492.
- [20] Zhang, P., He, J., Hong, X., Zhang, W., Qin, C., Pang, B. and Liu, Y. (2018) Carbon Sources/Sinks Analysis of Land Use Changes in China Based on Data Envelopment Analysis. *Journal of Cleaner Production*, **204**, 702-711.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.341>

- [21] 熊斌梅, 汪正祥, 李中强, 张娥, 田凯, 李亭亭, 李泽, 宋春禄. 七姊妹山自然保护区黄杉年龄胸径树高的相关性研究[J]. 林业资源管理, 2016(4): 41-46. <https://doi.org/10.13466/j.cnki.lyzygl.2016.04.009>
- [22] 刘鹏. 铁岭市六种主要乔木生长规律研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018. <https://doi.org/10.27327/d.cnki.gshnu.2018.000206>
- [23] 王伟峰, 段玉玺, 张立欣, 王博, 李晓晶. 不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(7): 669-678.
- [24] 李曙我, 贺传峰, 姚闻, 伍亮亮, 朱龙章, 王武文, 张俊, 张小燕. 人工杉木林单株径阶材种出材率表的编制[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(27): 95-99. <https://doi.org/10.13989/j.cnki.0517-6611.2018.27.029>
- [25] Forestry Knowledge Service System. <http://forest.ckcest.cn>
- [26] 中国碳市场分析平台[EB/OL]. <http://k.tanjiaoyi.com>, 2022-02-20.
- [27] 余智涵, 宁卓, 杨红强. 随机价格下杉木人工林的碳汇收益及最优轮伐期确定[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 753-768.