

分类号: S757.1

授予学位单位代码: 10434

学

号: 2017110506

# 山東農業大學

## 硕士学位论文

基于新指标的森林碳汇评价  
——以杉木、桉树为例

Forest Carbon Sink Evaluation Based on New Indicators  
—Taking *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus robusta* Smith  
for Example

研究生: 秦晓锐

学科专业: 森林经理学

研究方向: 森林可持续经营理论与技术

学院: 林学院

指导教师: 鲁法典教授

2020年6月2日

论 文 提 交 日 期： 2020 年 6 月 2 日

论 文 答 辩 日 期： 2020 年 5 月 3 日

学 位 授 予 日 期： 2020 年 6 月

学 科 门 类： 森林经理学

答 辩 委 员 会 主 席： 王迎


## 关于学位论文原创性和使用授权的声明

本人所呈交的学位论文，是在导师指导下，独立进行科学研究所取得的成果。对在论文研究期间给予指导、帮助和做出重要贡献的个人或集体，均在文中明确说明。本声明的法律责任由本人承担。

本人完全了解山东农业大学有关保留和使用学位论文的规定，同意学校保留和按要求向国家有关部门或机构送交论文纸质本和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权山东农业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文，同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并向社会公众提供信息服务。

保密论文在解密后应遵守此规定。

论文本文签名： 秦晓锐

导师签名： 

日 期： 2020年6月2日

## 符 号 说 明

缩写	英文	中文
CO <sub>2</sub>	Carbon Dioxide	二氧化碳
a	Annual	年
T	Ton	吨
ha.	Hectare	公顷
m	Meter	米
m <sup>3</sup>	Cubic Meter	立方米
C	Carbon Ctorage	碳储量
CF	Carbon Content	含碳率
M	Stand Volume	林分蓄积量
BEF	Biomass Expansion Factor	生物量换算因子
WD	Wood Density	木材密度
R	The ratio of underground to aboveground biomass	地下与地上生物量之比
$\alpha$	Outturn ratio	出材率
$\beta$	Residue ratio of timber processing	木材加工废弃率
DN	Ton-year	吨年

# 目录

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	III
<b>1 前言 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 国内外研究进展 .....	2
1.2.1 森林碳储量核算 .....	2
1.2.2 森林碳汇与经营决策 .....	3
1.2.3 林产品的固碳效益 .....	3
1.3 研究目的和意义 .....	4
1.4 研究内容 .....	5
<b>2 材料与方法 .....</b>	<b>7</b>
2.1 研究地概况 .....	7
2.2 数据收集 .....	8
2.2.1 杉木 .....	8
2.2.2 桉树 .....	9
2.3 研究方法 .....	9
2.3.1 林分蓄积生长模型的建立 .....	9
2.3.2 碳汇新指标—吨年 .....	12
<b>3 结果与分析 .....</b>	<b>17</b>
3.1 杉木和桉树林分蓄积生长方程 .....	17
3.1.1 基础方程筛选结果 .....	17
3.1.2 生长模型的检验 .....	17
3.1.3 各树种林分生长模拟 .....	18
3.2 林分吨年测算结果 .....	19
3.2.1 杉木和桉树林分林木吨年 .....	19
3.2.2 木质林产品的生命周期与吨年 .....	20
3.3 杉木与桉树林分吨年变化规律分析 .....	22
3.3.1 杉木与桉树林木吨年变化规律分析 .....	22

3.3.2 木质林产品的生命周期对各树种林分吨年指标的影响 .....	23
3.3.3 木质林产品的生命周期对各树种碳汇成熟龄的影响 .....	25
3.4 敏感性分析 .....	25
<b>4 讨论 .....</b>	<b>28</b>
4.1 研究局限及未来展望 .....	28
4.2 行动方案 .....	30
<b>5 结论与创新点 .....</b>	<b>32</b>
5.1 创新点 .....	32
5.2 结论 .....	32
<b>6 参考文献 .....</b>	<b>34</b>
<b>7 附录 .....</b>	<b>39</b>
<b>8 致谢 .....</b>	<b>40</b>
<b>9 攻读学位期间发表论文情况 .....</b>	<b>41</b>

## 中文摘要

近年来,随着温室气体浓度的逐渐升高,全球气候变化问题变得愈发严重,破坏了地球生态系统的平衡。而森林生态系统的固碳功能可以有效缓解全球气候变化问题,是地球生态平衡的重要保证。但是评价森林固碳效益时,选用碳储量作为评价指标不能体现出固碳时间所带来的额外效益,森林经营决策也不能与森林伐后木质林产品的生命周期相结合。为此,本研究提出了更加全面科学的固碳效益指标—吨年(Ton-year),定义吨年为综合考虑了林分固碳数量与固碳时间的森林固碳效益评价指标,其数学意义为森林连年固碳量乘以各部分碳被固定年数的累加,如林分固持1吨碳1年,则为1吨年;固持1吨碳10年或固持10吨碳1年,均为10吨年。对比碳储量,吨年指标综合考虑了固碳时间所带来的额外效益,将森林固碳效益的计量与林产品生命周期长度有机结合起来,在考虑经济效益的同时也能考虑固碳效益,给人工林经营管理和生产实践提供更加科学有效的指导。

本研究以广西壮族自治区为研究地点,选择杉木、桉树两个树种为研究对象,以广西壮族自治区2005-2015年3期一类连续清查资料和部分实地调查测量的数据作为计算基础。具体以各林场的标准地划分为基础,将295块杉木样地和481块桉树样地作为建模和检验数据。具体研究结论如下:

(1) 以上述数据为基础,对比4种常用的理论生长方程,通过非线性最小二乘法分别进行拟合,筛选得出杉木、桉树的最佳生长方程分别为Gompertz和Richards模型,通过了独立性检验,符合预测精度要求,将各方程作为预测林分生长的基础。

(2) 基于裸地造林的假设,模拟出两树种的林分生长曲线,通过生物量因子转换法计算出林分各时期固碳量,再进一步推算出新指标“吨年”描述的森林固碳效益值。研究发现在各树种预测期内,若不考虑后续木质林产品,当林分生长量逐渐趋于平缓至不再增长时,林木吨年仍会继续增长,并未出现峰值,此时为了更大的碳汇效益,应当尽量延缓收获时间。

(3) 加入林产品碳库进行分析后,随着林产品生命周期水平的提升,林分年均吨年呈现增长趋势,并开始在预测期内出现峰值,林分的碳汇成熟龄随林产品生命周期水平的升高而降低。以杉木为例,当林产品生命周期从40年延长至60年时,每公顷杉木林分最大年均吨年由 $67.82\text{t}\cdot\text{a}$ 增长为 $85.81\text{t}\cdot\text{a}$ ,林分碳汇成熟龄则从48年降低至34年,而假设林产品生命周期延长至300年时,每公顷杉木林分最大年均吨年增长为 $335.23\text{t}\cdot\text{a}$ ,



林分碳汇成熟龄为 27 年，逼近数量成熟龄。造成这种现象的原因是将林产品考虑为一个碳库，随着林产品生命周期水平的不断提高，其提供的固碳效益也在不断增大，当林产品固碳效益占林分总固碳效益的比例上升到一定程度时，缩短轮伐期以获得更多的木材产品继续固碳才是最好的方案。

(4) 对比杉木和桉树两个树种，其林分吨年指标均随林龄的增长而增大，但其中桉树的变化较为敏感，比如在不考虑后续林产品的情况下，当林龄增长至 20 年时，每公顷桉树林分年均吨年为  $98.31\text{t}\cdot\text{a}$ ，而杉木仅为  $11.32\text{t}\cdot\text{a}$ 。对于林产品生命周期的反应也是桉树最为敏感，比如，当林产品生命周期延长至 40 年时，桉树林分的碳汇成熟龄降低至 5 年，与桉树数量成熟龄（5a）持平，而此时杉木碳汇成熟龄为 48 年，与杉木数量成熟龄（26a）仍存在一定差距。而在林产品的各种生命周期水平下，代表固碳效率的年均吨年值均是桉树较大。结果表明就固碳效率而言，桉树>杉木，高生长速率且短生长周期的树种占有一定优势，但也受生物量转换系数和木材密度等其他因素影响。

**关键词：**森林碳汇；固碳效益；吨年；木质林产品生命周期；碳汇成熟龄



# Forest Carbon Sink Evaluation Based on New Indicators —Taking *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus robusta* Smith for Example Abstract

In recent years, with the increasing concentration of greenhouse gases, the global climate change problem has become more and more serious, disrupting the balance of the earth's ecosystem. The carbon sequestration function of forest ecosystem can effectively alleviate global climate change and is an important guarantee for the ecological balance of the earth. However, when evaluating the forest carbon sequestration benefits, the carbon reserve as the evaluation index cannot reflect the additional benefits brought by the carbon sequestration time, and the forest management decision cannot be combined with the life cycle of wood forest products. Therefore, this study proposed a more comprehensive science of carbon sequestration benefits indicators—ton-year, defines ton-year in considering the number of forest carbon sequestration and carbon sequestration time of forest carbon sequestration benefits measure, its mathematical meaning for several years of carbon sequestration forest carbon amount multiplied by the parts are fixed number of years of accumulation, such as If the stand holds 1 ton of carbon for 1 year, it is 1 ton-year. If one ton of carbon is fixed for 10 years or 10 tons of carbon is fixed for 1 year, both are 10 ton-year. Comparing the carbon storage, the extra benefits brought by the carbon sequestration time are comprehensively considered in ton-year . By organically combining the measurement of forest carbon sequestration benefits with the life cycle length of forest products, the carbon sequestration benefits can be considered as well as the economic benefits, so as to provide more scientific and effective guidance for the management and production practice of plantations.

This study took Guangxi Zhuang autonomous region as the research sites and chose *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus robusta* Smith as the research object. The calculation is based on the survey data of category I in the three periods of 2005-2015 and some data of field survey and measurement in Guangxi autonomous region. Based on the standard land division of each forest farm, 295 *Cunninghamia lanceolata* sample plots and 481 *Eucalyptus robusta* Smith sample plots were used as modeling and test data. The specific research conclusions are as follows:

(1) On the basis of the data, compare four kinds of commonly used the theory of growth equation, respectively by the nonlinear least squares method for fitting, screening for optimal growth of *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus robusta* Smith, equation respectively Gompertz and Richards model, through the independence test, conform to the

requirements of the prediction precision, each equation as the basis of predicting stand growth.

(2) Based on the hypothesis of bare land afforestation, the growth curves of each tree stand were simulated, the carbon sequestration amount of each stand period was calculated by biomass factor conversion method, and then the carbon sequestration benefit value described by the new index "ton-year" was calculated.. The study found that in the prediction period of each tree species, if the subsequent wood forest products were not considered, the annual growth rate of forest tons would continue to increase when the stand growth rate gradually leveled off to no longer increase, and no peak occurred. At this time, the harvest time should be delayed as much as possible for greater carbon sequestration benefits.

(3) After the addition of forest product carbon pool for analysis, with the improvement of forest product life cycle level, stands showed an increasing trend of annual average ton per year, and began to show a peak in the forecast period, The mature age of stands also decreased with the increase of life cycle level. Taking *Cunninghamia lanceolata* as an example, when the life cycle of forest products was extended from 40 years to 60 years, the maximum annual mean tonnage per hectare of Chinese fir plantation increased from 67.82t·a to 85.81t·a, and the maturity age of stand carbon sink decreased from 48 years to 34 years. When the life cycle of forest products is extended to 300 years, the maximum annual growth rate of Chinese fir plantation is 335.23 t·a and the maturity age of stand carbon sink is 27 years, which is close to the maturity age of quantity. The causes of this phenomenon is to consider as a carbon sink forest products, with the constant improvement of the level of forest product life cycle, which provide the carbon sequestration benefits are also increasing, when the forest products take up of the total carbon sequestration forest carbon sequestration benefits ratio rose to a certain extent, shorten the rotation period to get more wood products continue to carbon is the best solution.

(4) Compared with *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus robusta Smith*, the annual ton-year index of stand tonnage increased with the growth of forest age, but the change of *Eucalyptus robusta Smith* was sensitive. For example, without considering the follow-up forest products, when the forest age increased to 20 years, the average annual ton per hectare of *Eucalyptus robusta Smith* plantation was 98.31t·a, while that of *Cunninghamia lanceolata* was only 11.32 t·a. *Eucalyptus robusta Smith* is also sensitive to the life cycle of forest products. For example, when the life cycle of forest products was extended to 40 years, the mature age of carbon sequestration of *Eucalyptus robusta Smith* decreased to 5 years, which

was the same as the mature age of *Eucalyptus robusta* Smith (5a), while the mature age of *Cunninghamia lanceolata* carbon sequestration was 48 years, which was still somewhat different from the mature age of *Cunninghamia lanceolata* (26a). However, the annual ton-year value of *Eucalyptus robusta* Smith was larger at different life cycle levels of forest products. The results showed that in terms of carbon sequestration efficiency, *Eucalyptus robusta* Smith > *Cunninghamia lanceolata*. The tree species with high growth rate and short growth cycle have some advantages, but they are also affected by other factors such as biomass conversion coefficient and wood density.

**Key words:** Forest carbon sink; Carbon sequestration; Ton-year; Life cycle of wood forest products; Age of carbon sink maturity

# 1 前言

## 1.1 研究背景

森林是地球生态系统的主体，也是我国自然资源的重要组成部分，物种资源丰富，结构复杂，功能多样，不仅提供了国民经济发展需要的木材和林副产品，而且具有维护生态平衡、调节气候、保持水土、涵养水源及保护生物多样性等功能，在经济、生态、社会各方面提供着巨大的效益（李洋，2014）。森林资源具有物质的和非物质的多功能是其固有的自然属性，如今，人类对森林资源多功能的认识和需求同步增长，同时也有能力对森林资源进行更加集约有效的经营。

近年来，随着大气中温室气体浓度尤其是 CO<sub>2</sub> 浓度的持续升高，全球气候变暖问题成为了人类面临的巨大威胁，破坏了地球生态系统的平衡。因此，降低温室气体浓度，应对全球气候变化成为了全世界学者关注的问题。基于此趋势，有学者研究发现森林生态系统每年固定的碳约占整个陆地生态系统的三分之二，在降低温室效应、维持全球碳平衡中发挥着巨大作用（Kramer *et al*, 1981; Waring *et al*, 1985）。《巴黎协定》将森林管理作为减少二氧化碳排放、遏制气候变暖的途径之一。而在各种方法中，增加森林碳汇成本相对较低并且潜力巨大，已经成为应对气候变化的重要举措（Walker *et al*, 2014; 沈月琴等，2012）。而世界气象组织于 2019 年 11 月 25 日发布新一期《温室气体公报》，公报指出近期大气中温室气体浓度再次刷新了记录，温室气体水平持续增长已成长期趋势。12 月 2 日，《联合国气候变化框架公约》第 25 届缔约方会议在西班牙马德里正式开幕，联合国秘书长古特雷斯在开幕式上再次强调了气候危机的紧迫性，敦促各国采取有效措施，积极发展绿色经济。各种迹象印证了全球气候变化问题的日趋严重，从森林的碳汇效益方面入手，也是一个意义重大的研究角度。

人工林是我国森林资源的重要组成部分，在提供木材供给中扮演重要角色（刘世荣，2018）。人工林所带来的效益不仅为人们提供大量生活所需的木材和林副产品这一直接经济效益，还包括了形式间接但意义更为深远的生态效益，如其固碳释氧、保持水土等功能无时无刻不在发挥着作用。虽然我国人工林资源较为可观，其面积和增长速度均居世界首位，但我国人口众多，也存在着人工林总体上质量不高、森林资源的分布不平衡等一系列问题，想要解决以上问题，提升人工林的经济和生态效益并实现可持续经营及全面利用（李怒云等，2006），就需要对林分生长规律及人工林资源的经营管理进行研究（朱教君等，2016）。就森林的固碳作用而言，有学者最新研究发现世界上碳汇最

大的森林不是热带雨林，而是一些林木较年轻的地区（Pugh *et al*, 2019），其中中国的再造林计划贡献重大（Tong *et al*, 2020）。可见人工林的固碳潜力不容小觑，研究人工林的固碳效益及经营决策有助于在了解林木生长规律的基础上更好地提高林分固碳在森林生态效益上的可解释性，并进一步与生产实践结合，对于林业经营者的生产工作具有十分重要的指导意义。

## 1.2 国内外研究进展

### 1.2.1 森林碳储量核算

自 20 世纪中叶工业革命以来，随着现代化工业的迅速发展，尤其是化石燃料的燃烧、森林的砍伐和草原的开垦等行为，对地球生态系统产生了十分恶劣的影响（Keeling *et al*, 1997）。在 20 世纪 60 年代，为了应对环境恶化的现象，世界范围内开展了关于森林系统碳储量的大规模研究，首先是国际科联建立的国际生物学计划在 1964 年开展，此计划的研究重点是各种生态系统的生物量的核算，同时促进了森林生态系统碳储量相关研究工作的展开；到了 20 世纪 70 年代末至 90 年代，国际上多名学者对全球森林生态系统的固碳过程进行了相关研究，计算得出森林植被碳库的存储量约占全球总量的 86%，表明森林不但能在区域尺度上较好地维护区域生态环境，而且在全球的碳平衡中也发挥着不可忽视的作用；到了 1997 年随着《京都议定书》的签署，各国对于森林系统的气候变化缓解功能一致肯定，各国林业部门关于森林生态系统碳储存能力的研究也逐渐深入（韩爱惠，2009）。

对于森林碳储量的计算，目前来讲比较常用的方法是通过测量植被的生物量再乘以其碳含量进行进一步换算（邓蕾，2011）。目前，国内外计算森林植被生物量通常采用的方法可总结为 5 大类，即微气象学法（包括空气动力学法、涡动相关法、涡动积聚法）、样地清查法（平均生物量法，生物量因子转换法（Fang *et al*, 2001; Hu *et al*, 2008），生物量因子连续转换法）、箱式法、数学模型法（Gough *et al*, 2008; 赵俊芳等，2009）和遥感法（Potter *et al*, 2008）。

在 1996 年，康惠宁团队对我国的森林固碳现状和潜力进行了估算，这是我国最早在国家层面上开展的森林碳储量核算研究工作，经计算她指出中国 1996 年年均净固碳量为  $0.8627 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，并预测在未来 20 年内中国森林净固碳能力约增加  $773 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ （康惠宁等，1996）。方精云等在 2002 年采用生物量换算因子法计算了 1998 年我国的森林固碳量，约为 174.17 亿  $\text{tCO}_2$ （方精云等，2002）。到了 2008 年，支玲等采用生物量换算因子连续函数法对三北防护林的碳汇价值量进行了评价（支玲等，2008）。2010 年，

罗云建用比值的形式描述了林分蓄积量与其生物量之间的关系,通过此方法计算出中国森林固碳量为 128.15 亿  $\text{tCO}_2$  (罗云建等, 2010)。2015 年,刘魏魏等针对不同区域运用多种计算方法估算了全球森林生态系统的碳储量为  $652\sim 927\text{Pg C}$ , 且固碳能力达到  $4.02\text{Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$  (刘魏魏等, 2015)。

### 1.2.2 森林碳汇与经营决策

森林的固碳能力受多种因素影响 (John *et al*, 2001; Shu *et al*, 2019), 欧美等发达国家在与碳汇相关的森林经营决策方面已经有了一定的研究和积累。学者们通常是采用线性规划的方法探讨资源分配以达到木材和碳汇供给收益的最大化 (Spring *et al*, 2005; Yoshimoto *et al*, 2007), 以此为依据来对比木材采伐所带来的经济价值与碳汇功能所带来的生态价值之间的大小, 并确定何时进行采伐。

在国外有学者通过模型模拟的方式分析出通过一些森林管理手段在一定程度上是可以得到木材产量和碳储量最佳组合 (Thornley *et al*, 2000), 也有研究通过土地期望值法 (LEV) 验证了若将木材砍伐量作为碳排放的一种方式来考虑, 林分的最优轮伐期会受到十分显著的影响, 并且间伐对林分到达土地期望最大值的时间影响不大 (Köthke *et al*, 2010)。所以, 延长轮伐期, 降低采伐强度或完全停止采伐虽然牺牲了生物能源和林产品, 但可以将森林的碳储量维持在一个较高的水平 (Hudiburg *et al*, 2009; John *et al*, 2011), 也是一种低成本的减排方法 (Miriam *et al*, 2016)。而不同森林管理方法对森林碳储量存在影响, 尤其是采伐频率与采伐后的结构保留度的影响极为显著 (Jared *et al*, 2011)。

现有国内森林碳汇研究领域, 主要集中在现有森林资源水平的碳储量计算、空间分布模拟, 以及碳市场与碳政策相关方面, 而且研究对象主要是针对以树种为单位的大尺度区域范围, 而非森林经营主体 (朱臻等, 2014)。与碳汇效益相关的森林经营决策的研究也十分稀少, 对于不同经营规模与水平的森林经营主体, 目前也尚未给出明确与之对应的的经营决策方案。

### 1.2.3 林产品的固碳效益

木质林产品为森林砍伐后的一种碳储存形式, 在日本将木造建筑称为城市中的“第二森林” (吴智慧, 2015)。但是在起初林产品的固碳功能往往被人们忽略掉, 直到 1990 年 Dewar 指出砍伐后森林所储存的碳会转移到产品中 (Dewar, 1990), 但各学者对于林产品使用周期与森林碳储量的关系并没有一致的说法 (Dewar, 1992; Houghton *et al*, 1996)。



在联合国气候变化框架公约附属科技咨询机构(SBSTA)第4次会议上首次提出了木质林产品的碳储量问题,最初政府间气候变化专门委员会(IPCC)给出的假设是木质林产品碳储量会在采伐当年立即返回至大气(IPCC, 1996)。而全球林产品的碳储量不断增长,这样简单认为回归大气的想法并不正确(Winjum *et al*, 1998)。为科学合理地计量木质林产品碳储量,1998年达喀尔会议确定了3种可供选择的计量方法,即储量变化法、生产法和大气流动法(Brown *et al*, 1998)。随着人们对森林固碳效益的日益关注,木质林产品的继续固碳属性逐渐受到重视,林产品碳储量估算方法逐渐完善。在国家或大区域尺度,有很多学者从经济学或林产品替代减排等角度对各地区林产品碳储量进行了估算(Johnson *et al*, 2019)。各国学者检验了林分尺度上将伐后木材产品纳入碳核算的意义(Jared *et al*, 2011),研究发现在考虑林产品的碳储存时,所有程度的采伐都表现出碳的净封存(John *et al*, 2011);此时若想使森林的碳利用达到最高状态,应该鼓励对木材产品的使用和循环利用(Bellassen *et al*, 2014),可持续管理的森林林产品和木材生物能源可以在长期内显著促进温室气体减排(Geng *et al*, 2017)。

在我国关于木质林产品的研究主要集中在我国在林产品的生产消费及进出口贸易中林产品的碳储量核算(陈家新等, 2018),或是从生命周期的角度来计算我国林产品的碳储量及排放量(Zhang *et al*, 2018)。也有学者探讨了木材在生命周期中的固碳作用以及对全球环境的保护作用,并倡议现代社会应大力推进木材与木质材料的有效加工利用,以促进低碳经济的发展(吴智慧, 2015),但目前仍没有研究将林产品的生命周期与森林经营方案详细地结合起来。

### 1.3 研究目的和意义

目前国内外学者对于森林及后续林产品的固碳功能表示肯定,但对于以何种森林经营方式做到固碳效益最大化还存在一定分歧(Bellassen *et al*, 2014),没有明确的经营方案,对于林产品生命周期与森林经营的联系也未有深入探讨。而碳在自然界中在气态和固态之间不断转换,地球上碳汇的很大一部分在本质上是短暂的(Pugh *et al*, 2019),以碳储量来表达森林碳汇也呈现一种瞬态性。国内外关于森林固碳效益的研究均以碳储量作为核算指标,但是以碳储量作为森林固碳效益指标存在以下三点弊端:第一,森林固碳是一个持续的过程,若森林可以将CO<sub>2</sub>固定更久的时间,则可以产生更大的生态效益,此部分效益用碳储量作为指标无法直观地体现出来。第二,碳储量只能反映当下时期林分所固定碳的总量,不可区分各生长时期林分固碳质量的差别。例如当林分进行砍伐时,林分生长初期所固定的碳一直持续至今,但最近一年新固定的碳对于生态效益只



有很短暂的贡献，所以林分早期固碳的贡献应当大于近期固碳的贡献。第三，森林伐后木质林产品的碳储量是固定的，原则上来说只要木质林产品仍将碳固定在产品内并且未释放到大气中，就仍然起到固定碳的作用，但是延长林产品生命周期或使用寿命并不能体现出固碳效益的改变，也没有与森林经营联系在一起。

因此，为了更全面更科学地研究和计算森林固碳所带来的生态效益，本研究提出了吨年（ton-year）这一新指标。首先，吨年指标结合考虑了碳储量与固碳时间，使用吨年作为固碳效益新指标，能体现出 CO<sub>2</sub> 被固定的越久，林分对于固碳效益的贡献值越大这一特征。所以当林分生长趋于平缓至不再生长时，随着固碳时间的增加，虽然碳储量几乎没有变动，但是吨年仍会增加。其次，林分砍伐后有一部分碳以木质林产品的形式被继续固定一段时间，即使木质林产品的碳储量不会增加，但其吨年会随林产品生命周期延长而增加，反映了林产品每多存在一年，便可多一年的固碳效益。

吨年作为固碳效益评价新指标，在结合考虑了固碳量和固碳时间两个重要因素后，可以更加全面科学地评价林分包括后续木质林产品的固碳效益，提出明确的林分经营方案，在实际工作中的适用具有非常重要的意义。

## 1.4 研究内容

本研究具体内容如下：

（1）两树种生长方程的建立。以广西地区杉木和桉树为研究对象，将 2005-2015 年 3 期广西地区一类连续清查资料和补充调查的关于杉木、桉树的共 776 块标准地数据按比例分为建模数据和检验数据，通过对 4 种常用理论方程的筛选与检验，得到两树种的最优蓄积生长预测方程，以此为基础来预估林分蓄积随林龄的变化情况。

（2）林木吨年指标的规律分析。选择生物量转换因子法中的 IPCC 法计算出各树种的各时期碳储量，并通过吨年计算公式进一步得到林木吨年指标。分析林木吨年指标在生长过程中的变化规律。

（3）林分吨年指标的规律分析。以前人调查研究的林产品生命周期数据为基础，通过吨年计算公式进一步计算林产品不同生命周期水平下林分吨年指标，探讨加入林产品碳库进行分析后林分吨年指标变化规律。并对出材率这个可能变化的不确定因素进行敏感性分析。

（4）林产品生命周期水平对林分碳汇成熟龄的影响分析。以吨年指标为基础分析不同生命周期水平的木质林产品对两树种林分碳汇成熟龄的影响，并针对各树种的碳汇成熟龄对林分经营方案提出建议。

(5) 两树种的规律差异对比。对比杉木和桉树两个树种在以吨年指标为基础的固碳效益方面的差异，并分析其存在差异的原因。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究地概况

#### 2.1.1 地理位置

广西壮族自治区位于中国华南地区,界于北纬 $20^{\circ}54'$ ~ $26^{\circ}24'$ ,东经 $104^{\circ}28'$ ~ $112^{\circ}04'$ 之间,东临广东,东北靠湖南,西北靠贵州,西与云南毗邻,西南与越南接壤,南靠北部湾并与海南隔海相望,广西总体陆地面积达23.7万平方千米,海域面积约4万平方千米。

#### 2.1.2 地形地貌

广西位于两广丘陵西部,云贵高原的东南边缘。整体呈现出自西北向东南逐渐降低的趋势。其中山岭相连,山体较为庞大,其间较多峡谷,四周多被山地、高原环绕,其中部和南部多为丘陵平地,整体呈盆地状,有“广西盆地”之称。

广西地区总体是山地丘陵性盆地地貌,按海拔从高到低分为山地、丘陵、平原3类。广西的山地主要以中山(海拔800米以上)和低山(海拔400~800米)为主,约占广西土地总面积的39.7%;丘陵(海拔200~400米)占10.3%;海拔200米以下地貌包括谷地、河谷平原、山前平原、三角洲及低平台地,占26.9%。

由于受到太平洋和印度洋两大板块挤压的原因,广西境内的山脉大多呈弧形,整体分为盆地边缘山脉和内部山脉。其中东北—西南走向的驾桥岭、大瑶山和西北—东南走向的都阳山、大明山两列弧形山脉为内部山脉,盆地中部被这两列弧形山脉分割,外弧形成以柳州为中心的桂中盆地,内弧形成众多中小盆地。盆地边缘山脉从方位上分有广西北部的凤凰山、九万大山等,东部的猫儿山、越城岭等,东南部的云开大山,南部的大容山、六万大山、十万大山等,西部的岩溶山地,西北部的金钟山、岑王老山等。其中盆地边缘山脉中的猫儿山为华南第一高峰,主峰海拔2141米。丘陵错综交叉分布,集中在广西的东南部、西南部和南部。平原主要有河流冲积平原和溶蚀平原两类,河流冲积平原中较大的有浔江平原、郁江平原、宾阳平原、南流江三角洲等,其中浔江平原面积达到630平方千米,为面积最大的平原。广西境内喀斯特地貌为典型地貌,分布广泛,集中连片分布于广西西南部、西北部、中部和东北部,约占土地总面积的37.8%,其发育类型繁多,十分罕见。

#### 2.1.3 气候特征

广西地处低纬度,属亚热带季风气候区。广西大部分地区气候温暖,季节变化并不明显,呈现日照适中、热量充沛、雨水丰足且干湿分明的特点。

首先广西气候十分温暖,各地年平均气温达  $16.0\sim 23.0^{\circ}\text{C}$ ,等温线基本上呈纬向分布,气温由北向南递增,由河谷平原向丘陵山区递减。各地累年极端最高气温为  $33.7\sim 42.5^{\circ}\text{C}$ ,累年最低气温为  $-8.4\sim 2.9^{\circ}\text{C}$ 。这就决定了广西拥有出色的热量条件,广西各地  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $5000\sim 8000^{\circ}\text{C}$ ,是全国最高积温省区之一。丰富的热量资源,为各地因地制宜发展多熟制,提供了有利的条件。

其次广西是全国降水量最丰富的地区之一,广西整体年降水量在  $1080\sim 2760\text{mm}$  之间,大部分地区在  $1300\sim 2000\text{mm}$  之间。在地理分布上则具有东部多,西部少的特点。广西的十万大山南侧的东兴至钦州一带、大瑶山东侧以昭平为中心的金秀、蒙山一带、越城岭至元宝山东南侧永福等地为广西的多雨区,其年降水量分布在  $1700\sim 2760\text{mm}$  之间。由于受冬夏季风交替影响,广西降水量季节分配并不均匀,其中 4~9 月强降水天气比较频繁,总降水量占全年降水量的  $70\%\sim 85\%$ ,此时容易发生洪涝灾害;而 10~3 月则降水相对较少,总降水量仅占全年降水量的  $15\%\sim 30\%$ ,此时容易引发森林火灾。

#### 2.1.4 自然植被

广西地区生态环境较好,自然植被种类丰富,主要的森林植被有季风常绿阔叶林、常绿季雨林、针阔混交林、亚热带针叶林、亚热带落叶阔叶林等(何芸,2018)。广西是我国退耕还林工程和石漠化综合治理工程实施的重点地区。根据广西森林资源第九次连续清查资料,广西现有森林面积 1430 万公顷,居全国第六位,其中乔木林面积 894.58 万公顷,人工乔木林面积 381.02 万公顷;全区森林覆盖率 60.17%;活立木总蓄 74430 万立方米,其中森林蓄积 67752 万立方米;人工林面积 734 万公顷,人工林蓄积 34516 万立方米,森林生态功能等级达到中等以上的森林占 75%。

### 2.2 数据收集

将广西壮族自治区林业勘测设计院和国家林业局调查规划设计院采集与收集的 2005 年、2010 年和 2015 年共 3 期森林资源调查数据与补充调查的杉木与桉树的标准地数据结合,共得到 314 块杉木样地、518 块桉树的标准地数据作为建立杉木和桉树林分生长收获模型的数据基础。国家森林资源连续清查的主要对象是森林资源及其生态状况,主要包括:包括样地号、标准地尺寸、土地类型(地类)、GPS 经纬度坐标、植被类型、经营等级、经营措施、林木起源与权属、林种、蓄积以及生态状况等。

#### 2.2.1 杉木

杉木大多为人工林，栽培历史悠久，种植区域也较为广泛，杉木森林面积占全国森林总面积 7.24%，蓄积量占全国总量的 5.49%，可用作风景林，也是我国南方重要的速生用材树种之一。杉木分布较广，适合在土层较深且肥沃的酸性黄壤土中生长，同时喜欢湿润少风的环境。受气候及土壤因素影响，杉木在我国 16 省均有分布，其分布区域西侧至四川中南部及云南东南部，北达秦岭、淮河线，东至沿海区域，南至两广地区的中部；其垂直分布的上限因区域不同而有差异，如东部在海拔 700m 以下，西部在海南 1800m 以下，云南在海拔 2600m 以下（祁承经，2015）。

## 2.2 桉树

桉树是世界三大速生树种之一，1890 年自澳大利亚引进，迄今已引进近 100 种，主要的栽培地为我国的西南部地区。桉树生长速度极快，喜欢生长在日照时长较长的地区，能耐干旱贫瘠，其木材纹理交错，易开裂，现在是纸浆用材林的主要树种。由于桉树生长周期短，可以在短期内带来可观的经济效益，所以其整体造林规模也十分庞大。但值得一提的是，桉树人工林的生态效益也一直存在争议，有学者认为桉树人工林存在消耗林地水分、造成地力衰退、降低生物多样性等问题（祁承经，2015）。

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 林分蓄积生长模型的建立

#### 2.3.1.1 数据处理

2005 年、2010 年和 2015 年 3 期广西壮族自治区一类调查数据里共布设了 314 块杉木样地和 518 块桉树样地。样本数量和分布点具有充分的代表性，样地覆盖了各地区的主要立地类型。在收集的样地中，剔除林分因子记录缺失或不详和数据明显有误的样地。共剔除 65 组异常数据后，得到 295 块杉木样地和 481 块桉树样地的数据，以此为基础，按 8: 2 的比例分别进行建模和检验。具体林分因子统计如表 1 所示：

表 1 广西地区杉木和桉树样地林分因子统计  
Table 1 Stand factor statistics of *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus robusta* Smith in Guangxi

树种 Species	林分变量 Stand variables	拟合数据 Fitting data					检验数据 Testing data				
		样地数	最小值	最大值	平均值	标准差	样地数	最小值	最大值	平均值	标准差
杉木	年龄/a	236	5	39	13.72	7.11	59	5	38	12.98	7.21
	蓄积/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	236	1.5	487.15	204.87	109.54	59	1.9	502.34	245.44	120.87
桉树	年龄/a	385	2	21	3.79	2.23	96	2	19	3.56	2.03
	蓄积/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	385	3.2	227.99	106.87	35.42	96	4.5	255.43	122.12	84.53

### 2.3.1.2 理论生长方程法

林分生长模型有多种形式,数量众多,许多研究者为了方便研究,根据建模的目的、方程的结构、模拟的对象等区别而进行模型分类。其中,根据林分生长模型构成因子的特点及对象的不同,将林分生长模型分为全林分生长模型、径级分布模型和单木生长模型三个种类 (Munro *et al*, 1974)。

全林分模型的基础是林分的整体特征,描述了整个林分总量及平均单株木的生长过程,也被称为第一类模型。其主要特点是以整个林分为单位,以林分整体特征变量为基础,如以林龄、立地、林分密度及经营措施等自变量建立回归方程 (邓成, 2010)。其中理论生长方程的特点是广泛的适用性、较强的逻辑性、方程参数具有明确的生物学意义,使用起来也比较方便,所以被广泛应用于林分生长规律的研究中。目前来讲 Richards, Logistic, Korf, Gompertz 和 Mitscherlich 这五种方程是在林业生产中比较常见且适用性较广、准确性较高的理论生长方程 (段爱国等, 2003)。而对于林分蓄积生长方程来说,对于生长方程的曲线有以下几点要求: 首先,在  $x$  (林龄) = 0 时,  $y$  (蓄积量) = 0, 并且呈现“S”型增长, 体现林分正常的生长趋势; 然后要求曲线存在拐点, 因为拐点的出现意味着林分处于连年生长的高峰期 (宁镇亚等, 2014)。而由于 Mitscherlich 方程不存在拐点, 所以根据前人的研究经验 (付甜等, 2014), 筛选去除掉 Mitscherlich 方程, 选取 Richards, Logistic, Korf 和 Gompertz 共 4 种常用的理论生长方程作为备选模型。这些方程对于林分生长预测均具有较好的适应性、较高的准确性以及统计学意义, 被广泛的应用于林业研究。详情见表 2:

表 2 常见林分蓄积收获模型  
Table 2 The basic models of common

模型 Model	模型表达式 Formula	出处参考 Reference
<b>Richards</b>	$y = a(1 - \text{EXP}(-kx))^b$	Richards (1959)
<b>Logistic</b>	$y = \frac{a}{1 + \text{EXP}(b - kx)}$	May (1976)
<b>Korf</b>	$y = a\text{EXP}(-kx^{-b})$	Korf (1939)
<b>Gompertz</b>	$y = k\text{EXP}(-\text{EXP}(a - bx))$	Gompertz (1825)

\*EXP 是自然对数函数, e 等于 2.718。

式中,  $y$  为林分每公顷的蓄积量, 单位为  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ;  $x$  为林分年龄, 单位为  $\text{a}$ ;  $a$  为代表了各树种生长极限的参数, 反映各树种在生长周期内的林分生长量的上限;  $b$  为与生长初始值有关的参数;  $k$  为生长速率参数, 反映各树种生长速度的高低。

本文将以森林蓄积作为因变量，林分平均年龄作为自变量，选用非线性回归，利用非线性最小二乘法拟合模型，得到关于林分蓄积-林龄关系的非线性生长模型。模型的拟合指标选择决定系数  $R^2$  和均方残差 MSE，以  $R^2$  最大，MSE 最小的原则来进行筛选检验，分别选择出各个树种的最优生长模型来进行下一步检验。

#### 2.4.1.3 模型精度检验

在各生长模型拟合完成之后，为了检验拟合模型的精度，判断模型是否适合投入林业生产中使用，本研究选择 4 种常用的统计量对拟合模型进行检验（徐国祥等，2008），包括平均误差（ME）、平均绝对误差（MAE）、平均相对误差（MPE）和预测精度（P）。

其中，平均误差（ME）指在等精度测量中，所测得所有测量值的随机误差的平均值；平均绝对误差（MAE）表示预测值和观测值之间绝对误差的平均值，表现预测值与实测值的偏离大小；平均相对误差（MPE）表示预测值和观测值之间的绝对误差与预测值的比值，可以用来评定其预测可信度的高低；预测精度（P）是指预测误差分布的密集或离散程度。本研究中，首先将各树种建模样本的  $R^2$ 、均方残差 MSE 作为模型评价指标，观察各树种在 4 种方程中分别拟合的最优结果；然后计算检验样本的预测误差统计量，用以检验最优方程的预测精度是否符合要求。

计算公式如下：

（1）决定系数  $R^2$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i}{\sum_{i=1}^n y_i - \bar{y}_i} \quad \text{式 2.1}$$

（2）均方残差 MSE

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{式 2.2}$$

（3）平均偏差 ME

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i \quad \text{式 2.3}$$

（4）平均绝对误差 MAE

$$MAE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right| \quad \text{式 2.4}$$

（5）平均相对误差 MPE

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \times 100\% \quad \text{式 2.5}$$

（6）预测精度 P



$$P = \left[ 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \right] \times 100\% \quad \text{式 2.6}$$

式 2.1-6 中： $y_i$  为第  $i$  个因变量的实际值， $\hat{y}_i$  为  $i$  个因变量的预测值， $\bar{y}_i$  为因变量实际值的平均值， $n$  为样本个数。

### 2.3.2 碳汇新指标—吨年

碳在自然界中以气态和固态的形式存在，并受各种因素影响在两种状态之间不断转换，因此地球上碳汇的很大一部分在本质上是短暂的（Pugh *et al*, 2019），以碳储量来表达森林碳汇也呈现一种瞬态性。为了缓解温室气体浓度过高引起的恶劣气候问题，人们可以通过增加碳汇量和延长固碳时间两种方法。

从森林固碳的角度来讲，碳被固定的数量越多，时间越久，那么森林对于生态环境的贡献越大。然而以碳储量作为碳汇效益评价指标时仅考虑了“碳被固定的数量”，没有考虑“碳被固定的时间”，所以碳储量并不能全面地表达森林的碳汇价值。国内外关于森林固碳效益的研究均以碳储量作为评价指标，此时需要更加全面科学的方法和指标。为了弥补碳储量作为固碳效益指标的不完善性，增强林分固碳时间效益的可解释性，本研究引入“吨年”作为固碳效益新指标。定义吨年为综合考虑了林分固碳数量与固碳时间的森林固碳效益评价指标，例如：1 吨年是指 1 吨碳被固定 1 年，若 1 吨碳被固定在森林或林产品中 10 年，则是 10 吨年，或者 10 吨碳被固定在森林或林产品中 1 年，也是 10 吨年。

但是需要注意的是，森林各生长时期对应的生长量的固碳时间也存在差异，例如：在一棵十年生林木树干内，其形成层不断向内分化形成木质部增加林木体积和固碳量，第一年形成的木质部部分所固定的碳已经持续固持了十年，而第十年新生长的部分仅仅将碳固持了一年。虽是同一棵林木，但其体内各部分生长量的固碳时间并不相同，可以说林木各生长时期固碳效益存在差异。所以，为了更加全面、科学地表述林分固碳效益，本研究定义吨年指标的数学意义为森林的连年固碳量乘以各部分碳被固定年数的累加。计算公式如下：

$$DN_n = \sum_{i=1}^n t_n C_n \quad \text{式 2.7}$$

式中， $DN_n$  为  $n$  年生林分的吨年，单位为  $t \cdot a$ ； $C_n$  为林分第  $n$  年的净固碳量，单位为  $t$ ； $t_n$  为林分第  $n$  年的生长量将碳固定至今的时间，单位为  $a$ 。

吨年的数学意义决定了每段时期的固碳效益贡献值可区分开来，同一棵树早期固定

碳所带来的效益要大于近期固定的碳。而且同等固碳量的林分，碳被固定的时间越早，此时刻下林分的吨年也就越大，体现出了  $\text{CO}_2$  被固定的越久，林分对于固碳效益的贡献值越大这一特征。所以可以预想到当林分生长趋于平缓至不再生长时，随着固碳时间的延长，虽然碳储量几乎没有变动，但是吨年仍会增加。而林分砍伐后虽然会损失一部分碳，但仍然有一部分碳以木质林产品的形式被继续固定一段时间，同理，即使木质林产品的碳储量不会增加，但其吨年会随着林产品生命周期的延长而增加。

林下植被、枯枝落叶与土壤层本身也是巨大的碳库(Raich *et al*, 1989)，但若非存在自然灾害或人为破坏等现象，林下植被、枯枝落叶与土壤层的固碳能力相对比较稳定，而林分的经营方式及后续木质林产品的利用途径却是森林经营者和消费者们可以控制的。所以本研究选择忽略林下植被、枯枝落叶与土壤层三个固碳库，以林分立木和伐后木质林产品两个较易控制的固碳库为研究对象，设定林分吨年由林分林木吨年和后续木质林产品吨年两部分构成。

本研究提出了新的林分固碳效益指标，并探讨分析其本身的变化规律以及将后续林产品与林分经营有机结合起来，来更全面地评价与探讨森林固碳潜力的极限值。本研究以林分固碳效益最大化为目的，探讨最适于固碳的经营方案，首先需要精确地计算出林分的碳汇成熟龄。与数量成熟类似，本研究设定在林分生长周期中林分年均吨年（由林分林木吨年与林产品吨年组成）达到最大的时期为碳汇成熟龄(史大林等，2007)，探究林产品不同生命周期对林分吨年指标乃至碳汇成熟龄的影响。

### 2.3.2.1 碳储量的计算

由于吨年是在碳储量的基础上综合考虑了固碳时间而得来的，所以所有的分析均以林分各时期的碳储量为基础。为了计算森林的碳储量，大部分学者选用通过测量植被的生物量再乘以其含碳率进行换算的方法（邓蕾，2011）。目前，国内外森林植被生物量计量方法通常可归纳为 5 大类，分别是微气象学法（包括空气动力学法、涡动相关法、涡动积聚法）、样地清查法（包括平均生物量法，生物量因子转换法，生物量因子连续转换法）、箱式法、数学模型法和遥感法。

单木树干与根、枝等其他树木器官之间存在着相关关系，可以按一定比值的形式表示出来，所以林分总生物量在原则上可以由树干材积推算出来（Brown *et al*, 1984），且加上计算简单、数据较为容易获得等特点，当下研究者们大多选择在森林蓄积量的基础上引入生物量转换因子（BEF）的生物量转换因子法（邓蕾，2011），其中包括：IPCC 法、BEF 为常数的生物量转换因子法（Turner *et al*, 1995；Brown *et al*, 1984；Alexeyev

*et al*,1995)、生物量转换因子连续函数法 (Birdsey *et al*,1993) 和生物量回归模型法 (胥辉等, 2001; 王仲锋等, 2005)。在以上方法中, IPCC 法是政府间气候变化委员会以森林蓄积、木材密度、生物量换算因子和地下地上生物量比等作为参数, 建立森林生物量模型, 指导各国开展生物量研究的一种生物量估算的方法 (李海奎等, 2010), 其优点是比较稳定, 同时也具有一定灵活性, 通过适当转换可在较大的范围尺度使用, 所以本研究选择 IPCC 法来进行林分碳储量的计算。其公式为:

$$C_t = CF \times M_t \times BEF \times WD \times (1 + R) \quad \text{式 2.8}$$

式中:  $C_t$  为  $t$  年时林分林木碳储量( $t/hm^2$ );  $CF$  为林木生物量含碳率, 各树种取值分别为杉木 0.520、桉树 0.525;  $M_t$  为林分  $t$  年时每公顷蓄积量, 单位  $m^3/hm^2$ ;  $BEF$  为林木生物量转换系数, 取值为杉木 1.1509、桉树 1.5613;  $WD$  为木材密度, 取值为杉木 0.307、桉树 0.578, 单位  $t/m^3$ ;  $R$  为林木地下生物量/地上生物量, 取值为杉木 0.246、桉树 0.236。这些缺省值由《碳汇造林项目方法学》和 IPCC《土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南》中提供的相关数据得到。

### 2.3.2.2 林木吨年

为了分析在不考虑后续林产品的情况下林分吨年的变化规律, 本研究通过生物量因子转换法得出林分各时期碳储量并进行进一步计算得出各树种在生长预测期内的吨年与年均吨年值。具体方法如下:

以广西地区 2005、2010、2015 年 3 期全国森林资源连续清查资料中的杉木和桉树共 776 块标准地为基础, 按一定比例进行建模和检验, 通过对 4 种理论生长方程筛选分别得出各树蓄积量预测模型。基于裸地造林的假设, 分别预测两树种的蓄积生长量, 得到各树种的蓄积-年龄曲线。最后利用生物量转换因子法中的 IPCC 法进一步计算得到各树种每年的林分固碳量。

由定义已知吨年的数学意义为森林连年固碳量乘以各部分碳被固定年数的累加, 所以可以得到林分林木吨年的计算公式为:

$$DN_n = \sum_{i=1}^n t_n C_n = nC_1 + (n-1)C_2 + \dots + 2C_{n-1} + C_n \quad \text{式 2.9}$$

式中:  $DN_n$  为林分  $n$  年时的林木吨年, 单位  $t \cdot a$ ;  $C_n$  为第  $n$  年的林木固碳量, 单位为  $t$ 。

由林木吨年公式计算得出各时期下不同树种林分林木吨年及其年均值, 并进一步分析其随林龄变化的规律。

### 2.3.2.3 木质林产品吨年

林分的收获和砍伐虽然会损失一部分碳储量，但木质林产品能够接替林木继续固碳，是森林碳循环中的重要组成部分之一，而木质林产品的产量及最终用途会对森林生态系统和大气之间的碳平衡起到不可忽视的影响（Johnston *et al*, 2020）。所以从林产品继续固碳的角度来看，在林分被砍伐之后，存在以下两种情况：第一，作为木质燃料，通过燃烧将碳以 CO<sub>2</sub> 的形式归还于大气之中，此时后续林产品并没有起到应有的继续固碳作用，因此其吨年数值为 0，仅考虑林分林木吨年；第二，作为工业原木，后续被做成家具、建材等产品，继续将碳以固体形式固定一定的期限，这一部分固碳效益也应计算在林分吨年内。由于木质林产品在生命周期内碳的排出量很低（吴智慧，2015），所以本研究忽略木质林产品生命周期内缓慢的碳释放，其吨年数值仅与林产品数量和生命周期有关。假设林分于  $t$  年时全部采伐且制作成木质林产品，后续木质林产品的碳储量不会再增加，此时林产品吨年与其生命周期相关，具体计算公式如下：

$$DN_m = CF * \alpha * (1 - \beta) * V_t * BEF * WD * (1 + R) * A \quad \text{式 2.10}$$

式中： $\alpha$  为出材率，取值为 0.7； $\beta$  为木材进行加工时的损耗，取值为 0.2（王红彦等，2017）； $A$  为木质林产品的生命周期，单位 a； $CF$  为杉木林木生物量含碳率， $V_t$  为林分  $t$  年时每公顷蓄积量， $BEF$  为林木生物量转换系数， $WD$  为木材密度， $R$  为林木地下生物量与地上生物量之比，取值与公式 2.8 中相同。

其中林产品的生命周期是从木材的采伐开始，到该产品在退出使用后的最终处理结束（陈家新等，2018），其长度受利用途径、生产方法、防腐工艺及回收处理方式等多种因素的影响。按照 FAO 的分类标准，伐后木质林产品可分为木质燃料和工业用原木两大类。其中工业用原木包括锯材、人造板、纸和纸板以及其他工业原木产品，且根据用途的不同其生命周期水平也存在差异，如纸和纸板的平均使用寿命大约 10 年，而锯材可以达到 60 年甚至更高（白彦锋等，2009）。但其产品生命周期长度也受其用途及回收处理方式的影响：某些耐用类林产品会有几百年的生命周期，比如矿柱；将废弃林产品置入垃圾填埋场，其分解速率也会产生变化（白彦锋等，2013），使其生命周期存在不确定性。为了探究不同生命周期的林产品对于林分吨年及森林经营的影响，本研究假设各树种林产品随着生产工艺、防腐技术的发展以及循环利用方式的改变其生命周期在不同水平变化，对比分析不同生命周期水平下的林分吨年指标的变化规律。

关于各树种林产品生命周期的设定，本研究以前人研究的林产品使用寿命统计数据

为基础（白彦锋等，2009），并在此基础上假设林产品生命周期水平不断提升，具体数值设定在 0-300 年。

#### 2.3.2.4 出材率敏感性分析

为了确保投资项目的成功，在进行决策时通常会存在一些带有不确定性却会对项目产生影响的因素，此时需要进行进一步分析，使这些因素在一定范围内分别向对投资项目有利和不利方向波动，判断所投资项目的经济效益对于这些不确定的变化因素的敏感程度，以此做到对项目有一个整体的了解，这就是敏感性分析(黄汉江，1990)。敏感性分析使决策者可以在资料数据并不充足的情况下对项目实施和投入后整体可能出现的不利情况进行把握与调整，设法缩小和弥补误差，确保投资项目的成功。同理，为了探究林分的最大碳汇效益，衡量对林业碳汇有明显影响且存在变化的风险因素也是不可缺少的一环，因此将该方法应用于林业项目上是有意义的（曹先磊等，2017）。

本研究将林分林木与后续木质林产品设定为两个主要固碳库。林产品生命周期和出材率可以通过制作工艺、循环利用方式和采伐方式的改变而产生变化，若能进行有效的控制与提升，可以分别影响林分后续木质林产品的固碳时间长度与固碳数量大小，作为影响林产品固碳效益的关键因素，必然会对林分的总体固碳效益产生影响。本研究在前面已经围绕林产品生命周期对林分固碳效益的影响进行了探讨与分析，所以，为了探究各因素对林分最大碳汇效益的影响，寻找合适的控制手段，本研究设定各树种出材率在 0.5~0.9 变动，探讨分析出材率对林分固碳效益的可能影响，并以此结果为基础寻找提升森林固碳效益的着力点。

### 3 结果与分析

#### 3.1 杉木和桉树林分蓄积生长方程

##### 3.1.1 基础方程筛选结果

在各树种的标准地数据支持下, 选用非线性最小二乘法, 通过对常见的 4 种理论生长方程分别进行拟合, 以决定系数  $R^2$  和均方残差 MSE 为判断标准进行模型筛选, 各树种 4 种常见生长方程的拟合结果如表 3 所示:

表 3 杉木、桉树林分的生长方程拟合结果

Table 3 Growth equation fitting results of *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus robusta* Smith plantations

树种 Species	模型 Model	参数估计 Parameter Estimation			$R^2$ Coefficient of Determination	MSE Mean-square Error
		a	b	k		
杉木	Richards	257.38	0.055	2.095	0.8911	89.3286
	Kolf	590.18	8.134	0.49	0.8092	118.2451
	Logistic	285.26	5.584	0.31	0.8539	102.4535
	Gompertz	288.71	2.129	0.128	0.9341	76.1516
桉树	Richards	215.8	0.399	2.810	0.9218	79.3731
	Kolf	321.31	3.395	0.802	0.7382	172.7542
	Logistic	258.43	4.01	0.758	0.7923	126.3486
	Gompertz	221.28	1.824	0.644	0.8910	88.7532

从上图可以看出, 两个树种在 4 个理论方程间的决定系数  $R^2$  存在差异, 其中杉木拟合效果较好, 各模型的  $R^2$  均比较理想, 最高能达到 0.9341; 桉树的拟合结果略差于杉木。对于杉木林分来讲, 各模型  $R^2$  均在 0.8 以上, 但 Gompertz 模型的  $R^2$  为 0.9341, 均优于其他 3 种模型。对于桉树林分来讲, Kolf 与 Logistic 模型拟合效果均不理想, Kolf 模型的  $R^2$  仅为 0.7382, 而 Richards 模型的  $R^2$  为 0.9218, 均优于其他模型。本研究采用决定系数  $R^2$  最大和均方残差 MSE 最小的原则, 筛选出杉木和桉树的最优蓄积生长方程分别为 Gompertz 和 Richards 模型。

##### 3.1.2 生长模型的检验

对于筛选出的各树种最优模型, 利用剩余的 20% 检验样本对选定模型进行独立性检验, 结果见表 4。

表 4 杉木、桉树林分蓄积预测模型检验结果

Table 4 test results of prediction model of stand accumulation in plantations of *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus robusta* Smith

树种 Species	最优模型 The optimal model	ME Mean error	MAE Mean absolute error	MPE Mean percent error (%)	P Precision (%)	样本数量 Sample size
杉木	Gompertz	-0.1313	10.9129	-7.4353	93.09	97
桉树	Richards	-0.1529	12.9373	-9.3453	90.07	68

由表 4 可知，两预测模型的平均绝对误差 MAE 分别为 10.912 和 12.937，平均相对误差 MPE 表现出总体预测结果在±9.3%之间，预测精度 P 均达到 90%以上，其中，杉木林分模型预测精度较高，为 93.09%，桉树为 90.07%。各模型预测精度均符合要求，可投入使用。

3. 1. 3 各树种林分生长模拟

基于裸地造林以及不间伐的假设，以杉木和桉树的蓄积生长预测模型为基础，分别绘制两树种的蓄积生长模拟曲线，具体包括每公顷蓄积量、平均生长量和连年生长量。由于两树种的生长速度与生长周期存在差异，所以两树种设定了不同的预测期。杉木与桉树林分每公顷蓄积量的生长曲线如图所示，其中随着林龄的增长，各树种蓄积量( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )均呈“S”型曲线增长，符合基本的生物学规律。对比两树种生长曲线可以发现，桉树自生长初期以来生长速度就较快，且生长周期较短，并在 5 年时平均生长量达到最大值，数量成熟龄为 5 年，在第 11 年后生长逐渐趋于平缓。杉木生长速度也较快，但低于桉树，在 26 年时平均生长量达到最大值，数量成熟龄为 26 年,并在第 47 年后生长逐渐趋于平缓。具体曲线如图 1-2 所示：

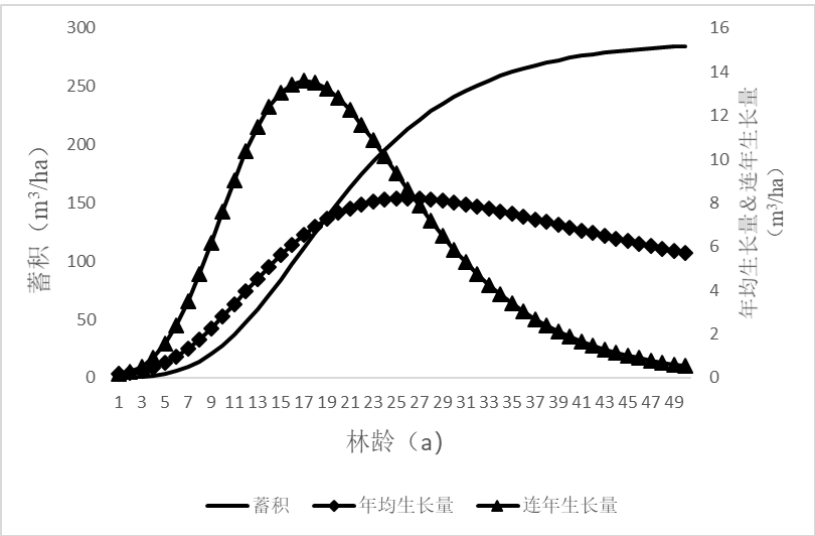


图 1 杉木林分每公顷蓄积预测

Fig. 1 Volume prediction of *Cunninghamia lanceolata* plantation per hectare



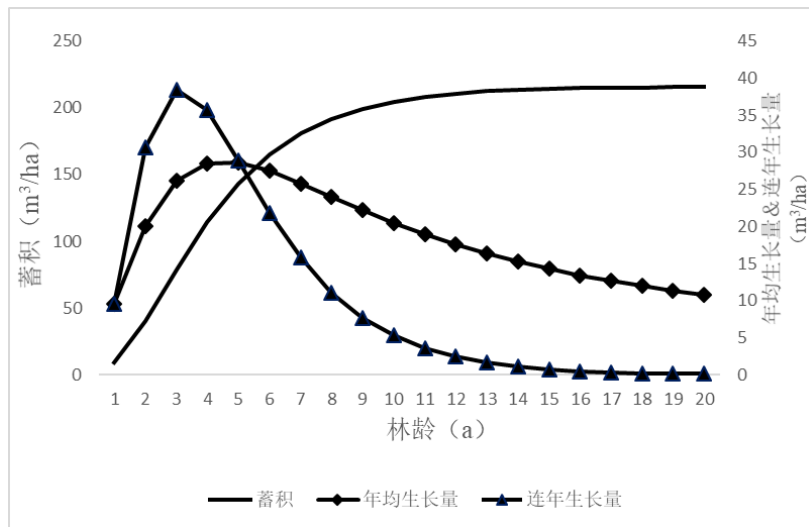


图 2 桉树林分每公顷蓄积预测

Fig. 2 Volume prediction of *Eucalyptus robusta* Smith plantation per hectare

## 3.2 林分吨年测算结果

### 3.2.1 杉木和桉树林分林木吨年

本研究设定林分林木及后续木质林产品两个固碳库，若林分为薪炭林或其后续木质林产品作为木质燃料，则会通过燃烧以  $\text{CO}_2$  的形式将林分固持的碳返还回大气之中，此时林产品并没有起到继续固碳的作用，其吨年数值为 0，仅考虑林木吨年值。

关于杉木与桉树林分林木吨年指标的具体计算，首先以两树种蓄积生长模型的预测结果为计算基础，通过生物量因子转换法中的 IPCC 法计算出林分各时期碳储量，作为进一步计算吨年指标的数据基础。然后与固碳时间相结合，通过吨年指标计算公式进一步计算得出各树种预测期内的每公顷林木吨年值，具体包括代表林木固碳效益总量的每公顷林木吨年，代表固碳效益的林木年均吨年，代表增长速度的吨年连年生长量，具体结果如表 5-6 所示：

表 5 杉木林分每公顷林木吨年预测结果

Table 5 Annual prediction results of tree ton-year per hectare of *Cunninghamia lanceolata* plantation

林龄 Age (a)	每公顷林木吨年 Ton-year per hectare (t·a)	每公顷林木年均吨年 Annual average ton-year per hectare (t·a)	吨年连年生长量 Ton-year annual growth (t·a)
5	1.57	0.31	0.79
10	19.88	1.99	6.97
15	86.11	5.74	18.86
20	226.49	11.32	34.09
25	435.86	17.43	46.51
30	694.71	23.16	54.76
35	984.34	28.12	59.68
40	1291.67	32.29	62.44
45	1608.79	35.75	63.95
50	1931.21	38.62	64.77

表 6 桉树林分每公顷林木吨年预测结果

Table 6 Annual prediction results of tree ton-year per hectare of *Eucalyptus robusta* Smith plantation

林龄 Age (a)	每公顷林木吨年 Ton-year per hectare (t·a)	每公顷林木年均吨年 Annual average ton-year per hectare (t·a)	吨年连年生长量 Ton-year annual growth (t·a)
2	28.73	14.37	45.44
4	140.22	35.05	82.78
6	318.40	53.07	104.53
8	533.88	66.73	115.41
10	765.29	76.52	117.08
12	1000.85	83.41	119.43
14	1240.36	88.59	120.51
16	1481.65	92.61	120.98
18	1723.76	95.76	121.21
20	1966.23	98.31	121.26

### 3. 2. 2 木质林产品的生命周期与吨年

本研究以两树种的蓄积生长模型和 IPCC 法计算出的林分各时期碳储量为基础, 将木质林产品作为第二个固碳库加入林分总固碳库进行分析。假设由于市场需要、生产者制作和防腐工艺提升等因素导致各树种伐后木质林产品的生命周期水平逐渐提高, 计算不同生命周期水平下林分吨年指标和碳汇成熟龄, 分析其变化规律。具体包括每公顷林分吨年、每公顷林分年均吨年以及木质林产品年均吨年, 其中取每公顷林分年均吨年最大值所在的年份为碳汇成熟龄。关于林产品各生命周期水平下林分的碳汇成熟龄的具体确定方法, 以 50 年林产品生命周期水平的杉木林分为例, 如表 7 所示

表 7 50 年林产品生命周期水平下杉木吨年指标预测结果

Table 7 The predicted results of ton-year index of *Eucalyptus robusta* Smith at the level of 50-year life cycle length of forest products

林龄 Age (a)	每公顷林分吨年 Ton-year per hectare (t·a)	每公顷林分年均吨年 Annual average ton-year per hectare (t·a)	木质林产品年均吨年 Annual ton-year of wood products (t·a)
2	2.90	1.45	1.38
4	12.79	3.20	3.00
6	40.36	6.73	6.24
8	98.65	12.33	11.29
10	198.63	19.86	17.87
12	341.38	28.45	25.25
14	523.27	37.38	32.57
16	733.77	45.86	39.11
18	960.60	53.37	44.41
20	1192.74	59.64	48.31
22	1421.95	64.63	50.86
24	1643.01	68.46	52.24
26	1853.26	71.28	52.65
28	2051.93	73.28	52.34
30	2239.42	74.65	51.49
32	2416.78	75.52	50.28
34	2585.36	76.04	48.84
36	2746.52	76.29	47.27
38	2901.56	76.36	45.64
40	3051.62	76.29	43.99
42	3197.69	76.14	42.38
44	3340.57	75.92	40.81
46	3480.94	75.67	39.30
48	3619.32	75.40	37.87
50	3756.15	75.12	36.49

\*框内数字代表每公顷林分年均吨年最大值。

由表 7 可以得知，在 50 年的林产品生命周期水平下，随着杉木林龄的增长，代表固碳效益总量的每公顷林分吨年值呈现一直增长的趋势，而代表固碳效率的林分年均吨年值呈现先增后降的趋势，并且在 38 年时出现了峰值。此时，确定 50 年林产品生命周期水平下每公顷杉木林分的最大年均吨年值为  $76.36t \cdot a$ ，与之对应的林产品年均吨年值未  $45.64t \cdot a$ ，碳汇成熟龄为 38 年。

同理，整理出各树种在不同林产品生命周期水平下的年均吨年最大值、碳汇成熟龄以及相应的林产品年均吨年值，并分析碳汇成熟龄随林产品生命周期水平的提升而变化的规律，如表 8-9 所示：

表 8 杉木木质林产品生命周期与吨年指标的关系

Table 8 The relationship between life cycle of *Cunninghamia lanceolata* wood forest products and ton-year index

木质林产品生命周期 The life cycle of wood products (a)	林分年均最大吨年值 Stand annual maximum ton-year (t·a)	木质林产品年均吨年 Annual ton-year of wood products (t·a)	碳汇成熟龄 Age of carbon sink maturity (a)
0	38.62	0	>50
20	53.22	14.59	>50
40	67.82	30.29	48
60	85.81	56.61	34
80	105.69	80.45	32
100	126.14	102.98	30
200	230.29	209.34	28
300	335.23	315.42	27

表 9 桉树木质林产品生命周期与吨年指标的关系

Table 9 The relationship between life cycle of *Eucalyptus robusta* Smith wood forest products and ton-year index

木质林产品生命周期 The life cycle of wood products (a)	林分年均最大吨年值 Stand annual maximum ton-year (t·a)	木质林产品年均吨年 Annual ton-year of wood products (t·a)	碳汇成熟龄 Age of carbon sink maturity (a)
0	98.31	0	>20
20	231.15	178.08	6
40	415.45	370.85	5
60	600.88	556.28	5
80	786.31	741.71	5
100	971.73	927.13	5
200	1898.87	1854.27	5
300	2826.01	2781.41	5

### 3.3 杉木与桉树林分吨年变化规律分析

#### 3.3.1 杉木与桉树林木吨年变化规律分析

由表 5-6 可以清晰发现,若不考虑后续木质林产品,那么在造林初期,两树种林龄较低且蓄积量较小时,林分每公顷林木吨年及年均吨年值都处于较低水平;随着林分的生长及固碳时间的延长,林分林木吨年快速增加,尤其是桉树,自造林初期起就一直处于快速增长的状态,吨年增长速度在两树种中 fastest,代表固碳效率的最大年均吨年值也最高。例如,当两个树种的林龄均为 10 年时,桉树的林分年均吨年为 76.52 t·a,而杉木的年均吨年仅为 1.99 t·a;当林龄为 20 年时,每公顷桉树林分年均吨年为 98.31 t·a,杉木则仅为 11.32 t·a。这是由于桉树林在造林初期就有了较多的生长量来固定碳,而吨年指标考虑了林分固碳的时间效益,所以造林初期和生长后期的年均吨年量均远远超

过杉木。

而值得一提的是，在杉木与桉树两个树种之间，桉树不仅生长速度高于杉木，其林木生物量含碳率（CF）、林木生物量转换系数（BEF）和木材密度（WD）分别为 0.525、1.5613 和 0.578，均高于杉木的 0.520、1.15 和 0.307。CF、BEF 与 WD 为受树种特性决定的影响森林固碳的因素，这意味着相比与杉木，桉树不仅可以更早地积累生长量来固碳，而且固碳的质量也要比杉木要高。总之，以吨年指标为计算基础，若不考虑后续林产品，桉树的固碳效率大于杉木，且生长初期固碳能力更强的树种具有一定优势。

虽然杉木和桉树的吨年增长速度及其年均吨年存在差异，但是在两树种的预测期内均未出现年均吨年的峰值，所以出于获得林分最大固碳效益的考虑（暂不考虑林分经济效益），在不考虑后续木质林产品及林分健康的情况下，此时尽可能地延缓砍伐时间是最好的决策。

### 3.3.2 木质林产品的生命周期对各树种林分吨年指标的影响

在林分砍伐之后，后续木质林产品因用途或生产工艺等不同而拥有不同水平的生命周期，在考虑了固碳时间的吨年指标体系下，与仅考虑林木吨年的林分对比，不同生命周期的木质林产品会给林分带来不同程度的吨年增量。由表 8-9 可以看出，在两个树种中，当林产品生命周期水平逐渐提升时，各树种的木质林产品年均吨年与林分最大年均吨年均处于增长趋势，意味着各树种的林分固碳效率是不断提升的，这与本研究预估的结果一致。以杉木为例，若不考虑后续木质林产品，每公顷杉木林的最大年均吨年为  $38.62 \text{ t} \cdot \text{a}$ ，当其后续木质林产品的生命周期为 20 年时，每公顷杉木的年均最大吨年为  $53.22 \text{ t} \cdot \text{a}$ ，后者约为前者的 1.38 倍；而设想当后续木质林产品的生命周期由于用途、生产工艺、处理手段等因素延长至 300 年时，每公顷杉木的年均最大吨年为  $335.23 \text{ t} \cdot \text{a}$ ，为不考虑林产品的林分的 8.68 倍，如此巨大的差距说明了当林分采伐时，如果后续木质林产品能将立木中的碳继续固定足够久的时间，同样可以提供可观的碳汇效益。

为了继续观察对比两树种林产品不同生命周期水平下的林分吨年值随林龄的变化趋势，本研究通过林木与林产品吨年公式计算出两树种各时期的年均吨年值，并绘制出各树种在生长周期内林产品生命周期不同水平变化时林分年均吨年的变化趋势图，如图 3-4 所示：

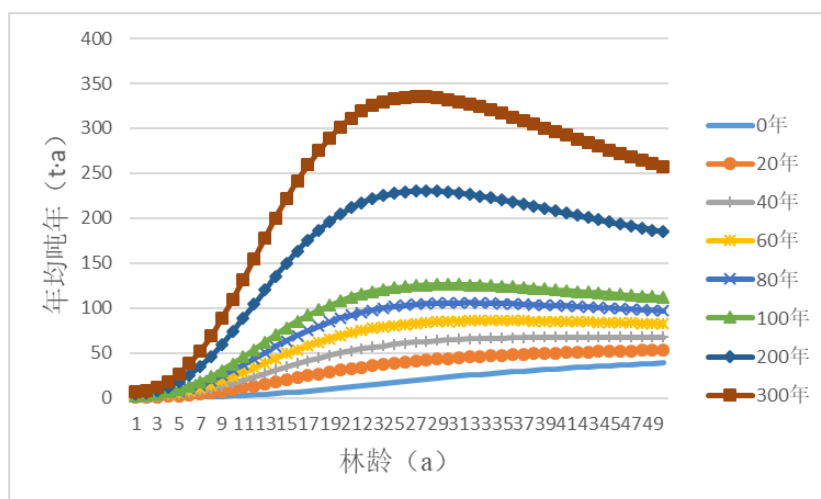


图 3 不同生命周期木质林产品杉木林分年均吨年对比

Fig.3 comparison of the average annual ton-year of *Cunninghamia lanceolata* plantation stands for wood forest products with different life cycles

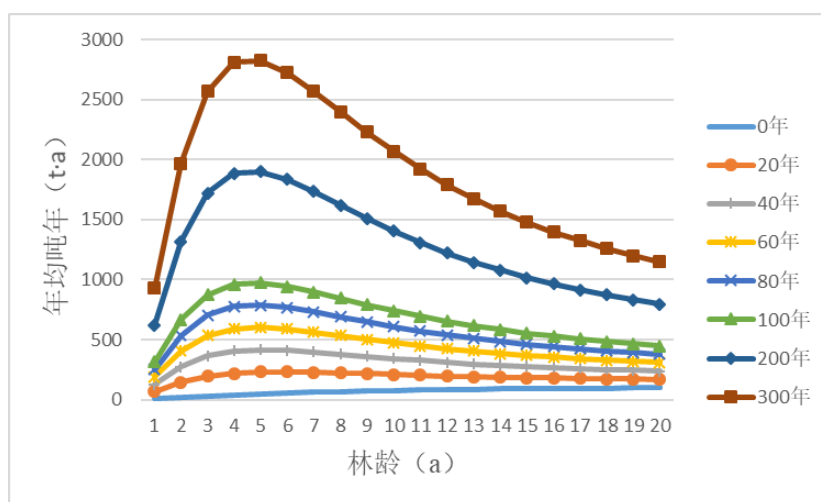


图 4 不同生命周期木质林产品桉树林分年均吨年对比

Fig.4 comparison of the average annual ton-year of *Eucalyptus robusta* Smith plantation stands for wood forest products with different life cycles

结合表 8-9 和图 3-4 可以发现，当木质林产品生命周期延长至一定水平时，两树种开始出现年均吨年的峰值。而在两树种之间规律又略有不同，首先，桉树的年均吨年峰值在 20 年林产品生命周期水平下已经出现，杉木则在林产品生命周期到 40 年水平时才出现峰值；其次，各生命周期水平下的桉树的年均吨年数值均大于杉木，如当林产品生命周期均为 100 年时，桉树年均吨年值为 971.73t·a，远大于杉木的 126.14 t·a。原因在于相比杉木，桉树有以下 3 个特点：（1）生长速度较快，可以在前期累积较为可观的碳储量。（2）生长周期要短，虽然意味着固碳时间也会较短，吨年值总量并不是最大的，但是代表固碳效率的年均吨年值会大于杉木。（3）林木生物量含碳率、林木生物量转换系数和木材密度均大于杉木，说明同样蓄积的桉树林固碳的质量要比杉木林高。

而且对比杉木, 在短时间内桉树林分可以产出更高碳储量的林产品, 例如, 假设各树种在林分生长至第 20 年时采伐, 每公顷桉树林产出的林产品碳储量为 69.84t, 而杉木林仅为 19.33t。由于林产品碳储量较为可观且桉树生长周期又短, 所以其林产品生命周期不需要延长太多也可产生较大的年均吨年值。换句话说, 桉树林产品年均吨年对于林产品生命周期的敏感度要比杉木更大, 且受树种本身因素决定, 桉树的固碳效率也高于杉木。

### 3.3.3 木质林产品的生命周期对各树种碳汇成熟龄的影响

上文中已经提到, 本研究以林分最大年均吨年所在的年份来定义碳汇成熟龄, 而数量成熟龄和碳汇成熟龄可作为判断最优轮伐期、制定森林经营方案的重要依据。

如表 8-9 所示, 若未考虑林分后续木质林产品, 各树种碳汇成熟龄均未在预测期内出现; 随着木质林产品的生命周期水平逐渐增高, 各树种在预测期内开始出现碳汇成熟龄, 并随林产品生命周期的延长而逐渐降低, 但是其降低速率也逐渐放缓, 当林产品生命周期增长至一定水平时, 碳汇成熟龄与数量成熟龄持平。原因在于随着木质林产品生命周期的延长, 木质林产品吨年占林分总吨年的比例也越来越大, 当这个比例足够大时, 木质林产品的固碳效益成为了影响林分总固碳效益的决定性因素, 此时可以缩短轮伐期, 目的是在生长周期内获得最多的林产品来提升林分的固碳能力。而目前流行的观点是主张延缓收获来获取更大的林分碳储量, 以达到最大的固碳效益, 若林产品生命周期延长至一定水平, 本研究的观点便与此相反。

两树种的碳汇成熟龄对于木质林产品生命周期变化的敏感度不同, 比如, 桉树林分在木质林产品生命周期为 40 年时, 碳汇成熟龄与数量成熟龄持平, 而杉木则在 300 年时仍未与数量成熟龄持平。造成这种现象的原因是桉树林分能够在早期便可积累大量的生长量, 所以对于桉树来说, 比起固碳的时间效益, 固碳的数量影响更大, 成为决定性的影响因素。而正是由于桉树生长速度快, 在短周期内可生产出数量可观的木质林产品来继续固定碳, 即便林产品的生命周期较短, 林产品的碳储量的数值也足够支撑吨年值, 且桉树生长周期短, 因此林分年均吨年值会比杉木高。

根据关于两树种碳汇成熟龄的分析, 可以得出一个共同的规律: 当林产品生命周期较短, 林产品吨年值占林分总吨年值比例较小时, 经营者需要适当延缓收获来保证一定的森林固碳效益; 但当林产品生命周期水平提升至一定程度, 林产品吨年值占林分总吨年的比例足够大时, 缩短轮伐期获得最多的林产品来继续固碳成为了最好的决策。

## 3.4 敏感性分析

本研究以杉木和桉树林分砍伐时出材率的初始值为基础, 分析林分砍伐时出材率分



别向有利和不利方向变动时对各树种固碳效率的影响进行敏感性分析。国外有研究认为木质林产品的整体储碳时间在 10~30 年，计算时常取 20 年为计算期（白彦锋，2013），所以本研究设定两树种林产品生命周期为 20 年，在其余影响因素皆取初始值默认不变的情况下，分析林分吨年指标对出材率这一影响因素的敏感程度。具体结果如表 10 所示：

表 10 林分吨年指标对各树种出材率的敏感性  
Table 10 Sensitivity of stand ton-year index to outturn ratio of each species

树种 Species	出材率 Outturn ratio	林分最大年均吨年 The largest annual ton-year of sandt (t·a)	林分吨年 ton-year of sandt (t·a)	碳汇成熟龄 Age of carbon sink maturity (a)
杉木	0.9	57.39	2869.75	> 50
	0.8	55.31	2765.46	> 50
	0.7	53.22	2661.18	> 50
	0.6	51.14	2556.89	> 50
	0.5	49.05	2452.62	> 50
桉树	0.9	283.01	1415.03	5
	0.8	256.58	1539.52	6
	0.7	231.15	1386.87	6
	0.6	205.71	1234.25	6
	0.5	180.27	1081.61	6

由于在 20 年林产品生命周期水平下，杉木林在预测期内并未出现吨年指标的峰值，所以取预测期末的吨年值作为最大年均吨年数值。如表 10 所示，随着出材率的逐渐提升，反映各树种固碳效率的林分最大年均吨年与相应的林分吨年均呈现上升趋势。以桉树为例，在其他因素均不变的情况下，当出材率从 0.7 增长至 0.9 时，杉木林分年均吨年及对应的林分吨年从 231.15t·a 上涨至 283.01t·a，上涨幅度为 22.43%；而当出材率降低至 0.5 时，杉木林分年均吨年及林分吨年下降至 180.27t·a，下降幅度为 22.01%。两树种涨幅和降幅均比较明显，表明两树种年均吨年指标对出材率的变化反应敏感。其中当当出材率从 0.8 增长至 0.9 时，桉树碳汇成熟龄由 6 年缩短为 5 年。理论上讲，若林产品生命周期水平提升，林分吨年指标对于出材率的敏感度应更高，今后可待进一步探索。

综上所述，两树种林分吨年指标对于出材率的变化反应敏感，且在一定的林产品生命周期水平下，出材率的增加会缩短林分的碳汇成熟龄，说明通过提高出材率的方式来增加林分固碳效率是可行的。同时，出材率水平的降低会导致林分固碳效率的降低。所以出于对固碳效益的考量，林业经营者在进行采伐时应注重采伐方式的选择，提高采伐效率与采伐质量，尽量提升出材率。

## 4 讨论

### 4.1 研究局限及未来展望

本研究是对于新的森林碳汇效益指标吨年的一个探索研究，在探索新指标可行性的同时还存在不足之处。后续研究应围绕以下几点不足来进行，做到更科学地完善计算方法，更广范围地探讨吨年的意义，更全面地分析森林固碳能力与生态效益贡献值的关系，为我国以提高生态效益为目的的碳汇公益林的经营提供科学的指导与理论基础。尚须进一步研究的问题如下：

#### （1）固碳库的选择问题

国内外学者探讨森林生态系统的固碳功能时通常将其分为林木层、林下植被层、枯枝落叶层和土壤层四个层次（Niu *et al*, 2006）。由于考虑到林下植被层、枯枝落叶层及土壤层三个固碳层次对于森林经营者来说可控性较低，且如若没有人为破坏等因素其固碳功能比较稳定，不便于直接计算。因此本研究使用吨年来量化森林固碳效益时仅计算了林分林木与后续木质林产品两个固碳库，并未将其他层次的固碳效益计入其中，所以严格来讲整个森林系统的吨年实际值应比预测值偏大。而两树种的吨年变化规律和林产品对森林固碳效益的影响规律的分析仍是客观的，对于数量和碳汇成熟龄的推算也是符合林分经营者的需求的。本研究下一阶段尝试推算林下植被层、枯枝落叶层及土壤层三个层次以吨年指标为基础的固碳效益值，来更全面中肯地评价整个森林系统的固碳效益。

#### （2）含碳率取值问题

目前，学者们在森林生态系统碳储量核算中最常用到的方法是将生物量与含碳率相结合的一系列方法，所以森林碳储量核算的准确性也会受到含碳率取值的影响。但是研究者进行区域生态体系固碳量测量及分析时，通常对木材的含碳率取固定值 0.45 或 0.5（郑帷婕等，2007；Levine *et al*, 1995），很少有学者进行实测。虽然林木树干中含碳率等会因树种遗传特性和区域环境等因素而存在差异（李凯锋等，2013），但同一树种间的含碳率变化差异较小（贾庆彬等，2013），因此，本研究忽略环境等因素所带来的含碳率差异，选择《碳汇项目方法学》中各树种含碳率的缺省值来作为计算林分碳储量的基础。若有条件，下一步研究可对不同树种含碳率进行实测，得到更加严谨科学的数据。

#### （3）碳泄露问题

在林分经营、采伐至木材生产过程中，均会产生碳泄露的现象（周媛等，2014），

这在一定程度上降低了森林的碳汇水平。在木材的采伐、集材、运输、贮存和生产过程中油锯、履带式拖拉机等作业工具的能耗也应计算在森林的碳排放之内，但是原则上讲这部分能耗是不可避免的，森林经营者只能尽可能地选择低油耗且高效率的采伐生产方式，所以本研究忽略了森林经营和采伐过程中的人为因素所导致的碳泄露。对于木质林产品来讲，如无人为损坏或焚烧，木质林产品在使用过程中是以较低的速率缓慢地腐烂、分解的（吴智慧，2015），即林产品所固定的碳存在一个缓慢的泄露过程，直至无法使用后被焚烧、填埋或重新利用。由于木质林产品的碳泄露是一个十分缓慢的过程，所以本研究忽略此过程，对木质林产品固碳效益的计算是基于木质林产品不存在腐烂情况且完美保存的理想假设下进行的。后续研究可以主动收集关于森林经营、采伐及木材加工过程中的能耗和碳排放数据，对森林各个过程中的碳泄露进行统计和计算，对森林系统的碳汇效益有一个更精确更完整的把控。

#### （4）生长方程尚需完善

有研究发现，由于立地条件与林分密度的差异会影响到林分的生长，不同的立地条件与林分密度也会对林分各个时期的固碳情况产生不同的影响（彭妮等，2015），而间伐也会使得林分固碳情况发生变化。但本研究建立生长方程时仅考虑了林龄与蓄积量的关系，生长方程比较简单实用，适合在大尺度范围内应用，为了更全面精确地研究不同树种林分吨年指标的变化规律及木质林产品生命周期对人工林经营决策的影响，本研究下一步计划在生长方程中加入立地、林分密度等因子，并且考虑间伐对林分总体生长情况带来的改变，对比分析不同立地、不同密度以及不同间伐方案下的林分在以吨年为指标的固碳能力的区别及经营决策的改变。

#### （5）树种选择的相关问题

本研究通过初步的对比分析发现，早期生长较快的桉树的固碳效率大于杉木。结果表明，虽然桉树在大众心中一直作为我国主要的用材林树种，但其碳汇效益也是同样不可忽视的。然而有大量文献和研究表明连作会显著降低桉树林的生产力（盛炜彤等，2018），为使林分长期保持较高的生产力水平与固碳水平，可考虑选择不同树种轮作的方式来解决此问题。

另外，本研究的目的是为了探明固碳效益新指标下林产品生命周期对固碳效益及林分经营尤其是碳汇成熟龄的影响，对于固碳效益的计算也是基于对各树种林产品不同生命周期长度的假设，而在现实中各树种木质林产品的生命周期水平会因树种特性、用途和处理方式的不同而存在差异，下一步研究会在搜集各树种林产品数据资料的基础上对

比分析更多树种的固碳效益区别。

#### （6）林产品处理方式

木质林产品废弃后不同的处理方式也会对森林的碳汇效益产生影响（陈家新等，2018），大体分为三种：焚烧、置入垃圾填埋场填埋地下和循环利用。其中焚烧会使林产品中的碳立即归还于大气之中，至此林分从林木到后续林产品的固碳功能结束；而置入垃圾填埋场填埋会有大部分碳处于稳定且长时间隔离在不会对全球气候变暖造成影响的状态（Micales *et al*, 1997），但在第三工作组对 IPCC 第五次评估报告的补充中提出虽然林产品在垃圾填埋场中几乎不会有碳泄露，但其在无氧条件下的腐坏会产生甲烷这种更高潜力的温室气体（Fischedick *et al*, 2007）；将不能再继续使用的林产品通过循环利用的方式继续延长林产品生命周期是一个不错的选择，但其不确定性较强。本研究下一步计划在林产品后续不同的处理方式入手，探讨不同处理方式对于林分固碳效益的影响，构建森林系统从生长、收获、林产品制造、利用最后到处理的完整固碳过程。

#### （7）混交林及异龄林的适用性问题

森林碳汇是一个累积的过程，吨年作为固碳效益衡量指标考虑到了固碳时间，自然需要获得林分年龄这一统计数据。在纯林及同龄林中，林龄及树种结构比较单一，吨年可以简单方便地适用。但在混交林及异龄林中林龄具有不确定性，树种之间生长也存在差异性，使得吨年指标难以完美适用，只能面向主导树种。下一步的研究会以吨年指标在混交林、异龄林中的适用为切入点，继续深入挖掘吨年指标的可操作性及更广泛的适用性。

## 4.2 行动方案

在全球气候变化的大背景下，本研究对于使用吨年作为新的固碳效益指标进行了探讨与分析，并得出了一些新的观点，同时也依据研究结果对社会各层面提供了行动方案，不同层面的人在延缓全球气候变化方面都可以做出自己的贡献。

首先，对于国际组织和国家政府而言，在全球气候变化的大形势下应当推出积极应对的政策，将增加森林的面积和提升森林质量作为着力点，尤其要鼓励满足可持续经营原则的用材林的发展，将重心放在增加森林碳库的体积；同时加大环保低碳宣传，鼓励消费者使用木质产品，并尽可能延长林产品的使用周期；最后，还应采取有效的政策和措施来预防森林火灾的发生，因为火灾会使森林所固定的碳立即返回大气，既不能进入林产品碳库，也不能替代传统化石能源燃烧，起不到减排的作用，所以从森林固碳的视角来看，森林火灾是最差的一种情况。

对于林业科研工作者来说,应尽快研究分析不同树种在不同立地条件下的碳汇增长规律,调查清楚不同树种生产木材的用途和林产品生命周期等一系列数据,进而推算出相应的碳汇成熟龄,供森林经营者参考。

对于森林经营者来说,应以科学的方法经营森林,将提升森林质量和固碳能力放在工作首位,具体措施有制定合适的森林经营方案,做好防火工作,在确定森林采伐年龄时充分考虑碳汇成熟龄,并且在采伐时优化采伐方式,尽量提高出材率,降低碳泄露等。

对于木材处理和加工者来说,应重视木材产品的制作和防腐程序,努力提升制作和防腐工艺,减少加工生产过程中的碳泄漏,尽可能地延长林产品的使用寿命。

最后,作为普通的林产品消费者来说,也应做出自己的贡献。首先,应该尽量选择使用木材产品,并精心呵护,以延长使用时间。例如,你的家具包含 1 吨的碳,你努力延长 1 年的使用时间,将对全球固碳效益额外贡献出 1 吨年。而且在处理木材产品时,也要选择合适的处理方式,如填埋或再加工循环利用。其次,面对森林和树木,要有更强烈的意识去保护,因为林木的价值不仅在于提供经济效益,而且它们体内所固持的碳也在时时刻刻为区域乃至全球生态做着贡献。

## 5 结论与创新点

### 5.1 创新点

针对碳储量仅能表述森林固碳数量等局限性,本研究首次提出了吨年的概念。首先,吨年指标结合考虑了固碳数量和固碳时间长度,与仅考虑森林固碳数量的碳储量相比可以更加全面科学地评价森林的固碳效益和固碳能力。

其次,结合吨年指标,从提升林产品的生命周期这一新的视角入手,探讨分析林产品生命周期的不同水平对森林固碳效益及碳汇成熟龄的影响,为森林经营的研究开拓了新的视角。

本研究提出吨年这一新概念,建议在设法提升森林固碳效益时,同时考虑森林的固碳数量和固碳时间,对森林碳汇评价提供了新的方向,并且可能对森林火灾损失评估、生物质能源的替代效应等森林碳汇相关研究提供新的研究思路。

### 5.2 结论

在全球气候变化问题日益严重的今天,森林系统的碳汇功能成为了重要的应对举措,而森林的固碳作用在大众心目中的地位也愈发重要。本研究在结合考虑森林固碳时间带来额外效益的基础上,首次提出“吨年”这一概念来更加客观全面地表述林分的固碳效益,继而在森林木质林产品继续固碳的角度探究吨年指标下木质林产品不同生命周期对于森林固碳能力和经营决策的影响。主要结论有以下 5 点:

(1) 以广西地区 2005-2015 年 3 期一类连续清查数据为基础,对比 4 种常用的理论生长方程,通过非线性最小二乘法分别进行拟合,筛选得出杉木、桉树的最佳生长方程分别为 Gompertz 和 Richards 模型,通过了独立性检验,符合预测精度要求,将各方程作为预测林分生长的基础。

(2) 若不考虑后续木质林产品,在两树种预测期内,即便林分生长量逐渐趋于平缓至不再增长,林分碳储量不再快速累积,但是林分吨年值仍然按一定的速率增长,并且未出现峰值。在此时为获取最大固碳效益,林分经营者应当尽量延缓采伐时间。

(3) 加入林产品碳库进行分析后将增加林分的吨年值,且林分年均吨年随着木质林产品的生命周期的延长而增加,并开始在预测期内出现峰值。以杉木为例,当林产品生命周期达到 40 年时,林分年均吨年在预测期内出现峰值,最大年均吨年为  $67.82\text{t}\cdot\text{a}$ ;而当林产品生命周期延长至 300 年时,林分最大年均吨年增加至  $335.23\text{t}\cdot\text{a}$ 。出材率也为影响林分固碳效率的因素之一,以桉树为例,在 20 年的林产品生命周期水平下,其出

材率由 0.5 增长至 0.9 时, 林分年均最大吨年自  $180.27\text{t}\cdot\text{a}$  增加至  $283.01\text{t}\cdot\text{a}$ , 增长幅度为 56.99%; 当出材率从 0.8 增长至 0.9 时, 林分碳汇成熟龄从 6 年缩短为 5 年。说明林产品生命周期与出材率均为显著影响林分固碳效率的因素。

(4) 以吨年作为固碳效益指标可以将木质林产品的生命周期与森林经营决策有机地联系起来。若不考虑后续木质林产品, 在各树种预测期内林分年均吨年处于一直增长的状态, 未出现碳汇成熟龄, 出于最大固碳效益考虑, 此时应尽可能地延缓林分砍伐时间。而加入林产品碳库进行分析后, 随着林产品生命周期的延长, 林分碳汇成熟龄呈现逐渐降低的趋势, 最终与数量成熟龄持平。以桉树为例, 当林产品生命周期从 0 年增长至 20 年时, 林分开始出现碳汇成熟龄, 为 6 年; 而假设当林产品生命周期延长至 40 年或更长时, 林分碳汇成熟龄降低至 5 年, 与数量成熟龄持平, 此时可以选择在林分数量成熟龄时进行采伐, 获得经济效益和碳汇效益的双赢。森林经营者在制定森林经营方案的时候应该把林分后续木质林产品的生命周期也作为一个重要因素来考虑。为了全面发挥森林的经济及生态(主要是固碳)效益, 不同生命周期水平的林产品对应的不同林分也应当制定与之对应的森林经营方案。

(5) 对比杉木和桉树两个树种, 其林分吨年指标均随林龄的增长而增大, 但其中桉树的变化较为敏感, 比如在不考虑后续林产品的情况下, 当林龄增长至 20 年时, 桉树林分每公顷年均吨年为  $98.31\text{t}\cdot\text{a}$ , 而杉木仅为  $11.32\text{t}\cdot\text{a}$ 。对于林产品生命周期的反应也是桉树最为敏感, 比如, 当林产品生命周期延长至 40 年时, 桉树林分的碳汇成熟龄降低至 5 年, 与数量成熟龄(5a)持平, 而此时杉木碳汇成熟龄为 48 年, 与数量成熟龄(26a)仍存在一定差距。而在林产品的各种生命周期水平下, 代表固碳效率的年均吨年值均是桉树较大。结果表明就固碳效率而言, 桉树>杉木, 高生长速率且短生长周期的树种占有一定优势, 但也受生物量转换系数和木材密度等其他因素影响。



## 6 参考文献

- 白彦锋,姜春前,张守攻.中国木质林产品碳储量及其减排潜力[J].生态学报,2008,29(1):399-405.
- 白彦锋,张守攻,姜春前.木质林产品碳储量研究进展[J].世界林业研究,2013,26(3):6-10.
- 陈家新,杨红强.全球森林及林产品碳科学研究进展与前瞻[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(4):1-8.
- 曹先磊.云南思茅松碳汇造林项目减排量、经济价值及其敏感性分析[J].生态环境学报,2017,26(2):234-242.
- 陈有民.园林树木学(第2版)[M].中国林业出版社,2011.
- 段爱国,张建国,童书振.6种生长方程在杉木人工林林分直径结构上的应用[J].林业科学研究,2003,16(4):423-429.
- 邓成,吕勇,雷渊才.林木生长和收获模型研究进展与发展趋势[J].林业调查规划,2010(01):11-16.
- 邓蕾,上官周平.基于森林资源清查资料的森林碳储量计量方法[J].水土保持通报,2011(06):147-151.
- 方精云,陈安平,赵淑清,慈龙骏.中国森林生物量的估算:对 Fang 等 Science 一文(Science,2001,291:2320~2322)的若干说明[J].植物生态学报,2002(02):243-249.
- 付甜,朱建华,肖文发.三峡库区主要森林类型的林分蓄积生长预测[J].林业科学研究,2014,27(3):429-434.
- 黄安,曾祥划,赵秀娟.树木学,北方本[M].中国农业大学出版社,2019.
- 韩爱惠.森林生物量及碳储量遥感监测方法研究[D].北京林业大学,2009.
- 何芸.广西森林火灾的发生规律及其与气象因子的相关性分析[D].2018.
- 何英,张小全,刘云仙.中国森林碳汇交易市场现状与潜力[J].林业科学,2007(07):106-111.
- 黄汉江.建筑经济大辞典:[M].上海:上海社会科学院出版社,1990.
- 何英,张小全,刘云仙.中国森林碳汇交易市场现状与潜力[J].林业科学,2007(07):106-111.
- 贾庆彬.长白落叶松碳含量遗传变异及高固碳种源与家系选择[D].东北林业大学,2013.
- 康惠宁,马钦彦.中国森林 C 汇功能基本估计[J].应用生态学报,1996(3).
- 李海奎,雷渊才.中国森林植被生物量和碳储量评估[M].中国林业出版社,2010.
- 罗军伟.鲁中山区不同立地条件下侧柏、赤松、刺槐生长分析与模拟[D].山东农业大学,2017.
- 李凯锋,罗于洋,王树森,李晓宇,刘波,王博,王旭,道如娜.科尔沁大青沟3种群落乔木层优势树种含碳率分布特征的研究[J].林业资源管理,2013(04):47-52.
- 李怒云,龚亚珍,章升东.林业碳汇项目的三重功能分析[J].世界林业研究,2006(03):1-5.
- 刘世荣,杨予静,王晖.中国人工林经营发展战略与对策:从追求木材产量的单一目标经营

- 转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J].生态学报,2018(1):1-10.
- 刘魏魏,王效科,逯非,欧阳志云.全球森林生态系统碳储量、固碳能力估算及其区域特征[J].应用生态学报,2015,26(09):2881-2890.
- 罗云建,王效科,张小全,朱建华,侯振宏,张治军,褚金翔.华北落叶松人工林生物量的估算方法[J].南京林业大学学报(自然科学版),2010,34(03):51-56.
- 林子清,陈幸良.我国木质林产品碳贸易政策研究[J].林业经济,2014,36(05):56-59+83.
- 宁镇亚,相莹莹,黄麟.区域尺度碳蓄积研究中的林分蓄积生长模拟——以我国五类主要树种为例[J].林业资源管理,2014(2):73-149.
- 彭妮,李凤日,贾炜玮,高慧淋.大兴安岭地区天然落叶松林乔木碳增量的研究[J].植物研究,2015,35(04):564-571.
- 祁承经,汤庚国.全国高等农林院校教材,树木学,南方本,(第3版)[M].2015.
- 盛炜彤.关于我国人工林长期生产力的保持[J].林业科学研究,2018,31(01):1-14.
- 沈月琴,王枫,张耀启,朱臻,王小玲.中国南方杉木森林碳汇供给的经济分析[J].林业科学,2013,49(09):140-147.
- 王红彦,左旭,王道龙等.中国林木剩余物数量估算[J].中南林业科技大学学报,2017(2).
- 王仲锋,冯仲科.样地林木生物量精度评定的研究[J].北京林业大学学报,2005(S2):173-176.
- 吴智慧.木材的生命周期与碳汇的关系分析[J].家具,2015(2):1-6.
- 胥辉,刘伟平.相容性生物量模型研究[J].森林与环境学报,2001,21(1):18-23.
- 徐国祥.统计预测与决策[M].上海财经大学出版社,2008
- 周国模,郭仁鉴,韦新良,王雪军.浙江省杉木人工林生长模型及主伐年龄的确定[J].浙江林学院学报,2001(03):3-6.
- 史大林,郑小贤.马尾松林碳储量成熟问题初探[J].林业资源管理,2007(04):34-37.
- 朱教君,张金鑫.关于人工林可持续经营的思考[J].科学,2016,068(004):37-40.
- 赵俊芳,延晓冬,贾根锁.1981-2002年中国东北地区森林生态系统碳储量的模拟[J].应用生态学报,2009,20(2).
- 支玲,许文强,洪家宜,刘燕,李平云.森林碳汇价值评价——三北防护林体系工程人工林案例[J].林业经济,2008(03):41-44.
- 郑帷婕,包维楷,辜彬等.陆生高等植物碳含量及其特点[J].生态学杂志,2007(03):307-313.
- 周媛,郑丽凤,周新年,巫志龙,周成军,李丹.基于行业标准的木材生产作业系统碳排放[J].北华大学学报(自然科学版),2014,15(06):815-820.
- 朱臻,沈月琴,徐志刚,吴伟光,宁可,王志强.森林经营主体的碳汇供给潜力差异及影响因素研究[J].自然资源学报,2014,29(12):2013-2022.
- Aber J., Neilson R. P., McNulty S..Forest Processes and Global Environmental Change: Predicting the Effects of Individual and Multiple Stressors We review the effects of

- several rapidly changing environmental drivers on ecosystem function, discuss interactions among them, and summarize predicted changes in productivity, carbon storage, and water balance[J]. *BioScience*, 2001, 51(9):735-751.
- Alexeyev V., Birdsey R., Stakanov V.. Carbon in vegetation of Russian forests: Methods to estimate storage and geographical distribution[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1995, 82(1-2):271-282.
- Bellassen V., Luyssaert S.. Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times[J]. *Nature*, 506(7487):153-155.
- Birdsey R. A., Plantinga A. J. , Heath L. S.. Past and prospective carbon storage in United States forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 1993, 58(1-2):33-40.
- Brown S., Lugo A.E.. Biomass of Tropical Forests: A New Estimate Based on Forest Volumes[J]. *Science*, 1984, 223(4642):1290-1293.
- Brown S., Lim B., Schlamadinger B.. Evaluating approaches for estimating net emissions of carbon dioxide from forest harvesting and wood products[R]. *IPCC/OECD/IEA Programme on National Greenhouse Gas Inventories*, 1998.
- Craig M. T. J., Volker C. R.. Global mitigation potential of carbon stored in harvested wood products[J]. *National Academy of Sciences*, 2019, 116(29) : 14526-14531.
- Daniel A. Y.. Comparison of an empirical forest growth and yield simulator and a forest gap simulator using actual 30-year growth from two even-aged forests in Kentucky[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 126(3):0-398.
- Dewar, R. C.. A model of carbon storage in forests and forest products[J]. *Tree Physiology*, 1990, 6(4):417-428.
- Dewar R. C., Cannell M. G. R.. Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples[J]. *Tree Physiology*, 1992, 11(1):49-71.
- Fang, J.. Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China Between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292(5525):2320-2322.
- Fang, J.. Forest Biomass of China: an estimate based on the Biomass–Volume Relationship[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(4):1084-1091.
- Fischedick M., Roy J., Acquaye A. . Industry In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Technical Report. *Computational Geometry*, 2007, 18(2):95-123.
- Gough C. M., Vogel .S., Schmid H.P.. Multi-year convergence of biometric and meteorological estimates of forest carbon storage[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(2):0-170.
- Houghton R. A.. Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon[J]. *Human Environment*, 1996, 25(4):267-272.
- Hudiburg T., Law B., Turner D. P.. Carbon dynamics of Oregon and Northern California

- forests and potential land-based carbon storage[J]. *Ecological Applications*, 2009, 19(1):163-180.
- Hu H., Wang G. G.. Changes in forest biomass carbon storage in the South Carolina Piedmont between 1936 and 2005[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5-6):0-1408.
- IPCC. Revised IPCC guidelines for national greenhouse inventory (volume 3: reference manual) [M]. *Bracknell: UK Meteorological Office*, 1996
- Jared S.N., William S. K.. Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products[J]. *Forest Ecology & Management*, 259(8):0-1375.
- John B.. Potential Influence of Forest Management on Regional Carbon Stocks: An Assessment of Alternative Scenarios in the Northern Lake States, USA[J]. *Forest Science*, 2011, 57(6):479-488.
- Keeling, C. D.. Climate change and carbon dioxide: An introduction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 94(16):8273-8274.
- Köthke M., Dieter M.. Effects of carbon sequestration rewards on forest management—An empirical application of adjusted Faustmann Formulae[J]. *Forest Policy and Economics*, 2010, 12(8):0-597.
- Kramer P.J.. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production[J]. *BioScience*, 1981, 31: 29-33.
- Levine J .S., Cofer W. R. I., Cahoon D. R.. Biomass burning a driver for global change. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29(3).
- Lin B., Ge J.. Valued forest carbon sinks: How much emissions abatement costs could be reduced in China[J]. *Cleaner Production*, 2019, 224:455-464.
- Micales J.A., Skog K.E.. The decomposition of forest products in landfills[J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 1997, 39(2-3):145-158.
- Niu X., Duiker S. W.. Carbon sequestration potential by afforestation of marginal agricultural land in the Midwestern U.S[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223(1-3):0-427.
- Potter C., Gross P., Klooster S.. Storage of carbon in U.S. forests predicted from satellite data, ecosystem modeling, and inventory summaries[J]. *Climatic Change*, 2008, 90(3):269-282.
- Pugh T. A. M.. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 116:4382-4387.
- Raich J. W., Nadelhoffer K. J.. Belowground Carbon Allocation in Forest Ecosystems: Global Trends[J]. *Ecology*, 1989, 70(5):1346-1354.
- Spring D , Kennedy D J , Nally R M . Optimal Management of a Flammable Forest Providing Timber and Carbon Sequestration Benefits: An Australian Case Study. *Social Science Electronic Publishing*, 2010, 49(3):303-320.
- Shu S. M., Wan Z.. Effects of tree size heterogeneity on carbon sink in old forests[J]. *Forest*

- Ecology and Management*, 2019, 432:637-648.
- Thornley J. H. M., Cannell M. G. R.. Managing forests for wood yield and carbon storage: a theoretical study[J]. *Tree Physiology*, 2000, 20(7):477-484.
- Tong, X., Brandt, M., Yue, Y.. Forest management in southern China generates short term extensive carbon sequestration[J]. *Nat Commun* ,2020,11(129):2041-1723.
- Turner D. P., Koerper G. J., Harmon M.E.. A Carbon Budget for Forests of the Conterminous United States[J]. *Ecological Applications*, 1995, 5(2):421-436.
- Vass, Miriam M., Elofsson K.. Is forest carbon sequestration at the expense of bioenergy and forest products cost-efficient in EU climate policy to 2050[J]. *Forest Economics*, 2016, 24:82-105.
- Walker D.. The Economic Potential for Forest-Based Carbon Sequestration under Different Emissions Targets and Accounting Schemes. [J] *Social Science Electronic Publishing*, 2014.
- Waring R. H., Schlesinger W. H.. Forest ecosystems. Concepts and management[J]. *Clinical & Experimental Allergy*, 1985, 75(75):284.
- Winjum J. K.,Brown S.,Schlamadinger B.. Forest harvests and woodproducts: sources and sinks of atmospheric carbon dioxide[J]. *Forest Science*, 1998, 44(2):272-284.
- Yoshimoto A., Róbert M.. Evaluation of carbon sequestration and thinning regimes within the optimization framework for forest stand management[J]. *Forest Research*, 2007, 126(2):315-329.
- Zhang X., Yang H., Chen J.. Life-cycle carbon budget of China's harvested wood products in 1900-2015[J]. *Forest Policy and Economics*, 2018, 92:181-192.

## 7 附录

表 11 参与项目课题情况

Table 11 Participation in the project

项目课题名称	课题名称	所属专项	起止时 间	经费 (万元)	本人承担 任务	进展情况 有无成果
人工林资源监测关键 技术研究 (2017YFD0600906)	人工林培育经 营智能化决策 技术	林业资源培 育与高效利 用技术创新	2017.7 —— 2020.10	30.92	主要参与	有

## 8 致谢

狄更斯说过：“这是最好的时代，也是最坏的时代。”我在新冠肺炎肆虐的2020年初完成了我的毕业论文，我对病毒和死亡充满了敬畏，也对知识和未来充满了向往。三年的时光转瞬即逝，回首往昔，橱窗里盛放的琳琅满目，是阜盛而过的年华栩栩生辉。一路走来，我看见过悬崖边上盛开的花朵，也踏上过长满尖刺的荆棘，我既会感谢花朵，也会感谢荆棘。在我的论文即将完成之际，我要对那些帮助鼓励我的人表示衷心的感谢。

首先，我要感谢我的恩师鲁法典老师，从论文选题到课题研究直至完成论文，鲁老师都在不留余力地指导我，我能顺利地完成三年的学术研究，离不开鲁老师仔细耐心的教导与陪伴。鲁老师严谨的治学态度、渊博的学识以及独特的人格魅力无时无刻不在感染着我，激励我在学术的道路上一直走下去。鲁老师既是良师，亦为益友，在我学术和生活上遇到困难的时刻，他总能及时地给予我启示，帮助我走出困境；而在我在科研上有了新想法的时候，鲁老师也会耐心倾听，并与我仔细地讨论。与鲁老师相处的时间总能使我受益匪浅，在人生的剩余阶段，我也会继续以鲁老师为榜样，砥砺前行。同时，我也要感谢森林经理学科的其他各位老师，感谢各位老师平日里学术上悉心的指导以及在我论文撰写阶段提供的宝贵建议。

其次，感谢“十三五”国家重点研发计划“人工林资源监测关键技术研究”（2017YFD0600906）科学基金资助项目。

同时，我也要感谢在入学之初给予我真诚帮助的师兄师姐，还有一直陪伴我的同学和320及308的朋友。感谢你们在学习和生活上给予我的陪伴和无私的帮助，这份真挚的友情将会对我今后的人生产生深远的影响。

然后，还要特别感谢我的父母和女朋友。他们在我读研期间给了我各方面无限的包容与鼓励，让我在面临困难之际可以坚定内心，不再退缩与胆怯。感谢你们默默的付出让我不断成长，为我的前行提供了动力。

最后，感谢各位在百忙之中抽出时间来参与论文审阅与答辩的老师，谢谢你们的付出与辛苦！

## 9 攻读学位期间发表论文情况

软件著作权两项：

单木生长模拟系统 V1.0（鲁法典，杜彪彪，秦晓锐）NO03221578(第三作者)

鲁中山区刺槐、赤松、麻栎及侧柏林抚育间伐模拟系统（王成德，秦晓锐，鲁法典）NO05529714（第二作者）