

不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响

王伟峰* 段玉玺 张立欣 王 博 李晓晶

内蒙古林业科学研究院生态功能与森林碳汇研究所, 呼和浩特 010010

摘 要 在全球气候变化背景下, 科学的经营管理是人工林碳汇提升的主要途径。合理轮伐期从一定程度上反映了人工林集约经营的理念, 是实现森林结构调整的主要影响因素之一。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)多代连栽出现立地生产力下降与轮伐期的选择密切相关, 开展不同轮伐期对杉木人工林碳固存影响的研究, 可为其可持续经营提供理论依据。通过设置不同年龄序列的杉木人工林野外观测样地, 应用野外观测数据对FORECAST模型进行验证, 在此基础上模拟不同轮伐期对其碳固存的影响。结果表明: (1)短轮伐期(15年)在150年间的总固碳量较高, 但固碳持久性较低, 每个轮伐期之间的固碳量下降幅度较大, 是一种不可持续的经营模式。(2)正常轮伐期(25年)和长轮伐期(50年)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。(3)在好的立地条件下(立地指数(SI) = 27), 轮伐期越短对地力消耗影响越大, 为了碳固存的持久性, 建议杉木人工林的生态轮伐期选择在25年以上。(4)应用FORECAST模型可以定量地评估人工林的固碳能力, 且该固碳能力是基于不同经营管理措施下的可持续固碳能力。

关键词 FORECAST模型; 生态轮伐期; 碳固存; 土壤有效氮; 可持续经营

引用格式: 王伟峰, 段玉玺, 张立欣, 王博, 李晓晶 (2016). 不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响. 植物生态学报, 40, 669–678. doi: 10.17521/cjpe.2015.0407

Effects of different rotations on carbon sequestration in Chinese fir plantations

WANG Wei-Feng*, DUAN Yu-Xi, ZHANG Li-Xin, WANG Bo, and LI Xiao-Jing

Research Institute of Ecological Function and Forest Carbon Sink, Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010, China

Abstract

Aims Under the context of global climate change, scientific management is the main way to enhance carbon sequestration of plantation forests. A reasonable rotation is one of the intensive management strategies, adjusting forest structure. The decline of productivity after continuous multigenerational cultivation is strongly related to its rotation. Therefore, it is necessary to study the effects of different rotations on carbon sequestration of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations, which can provide a theoretical basis for their sustainable management.

Methods We set up sampling fields of Chinese fir plantations with different age sequences, and used the observation data to test the FORECAST model. We then simulated the effects of different rotations on Chinese fir plantations sequestration using FORECAST model.

Important findings The results showed that over a 150-year period, total carbon sequestration was highest under short rotation length (15-year). However the carbon persistence was poorest and the decline of carbon between each rotation was biggest, indicating an unsustainable management model. Compared with short rotation, the total carbon sequestration under normal rotation (25-year) and long rotation (50-year) was lower. However, the carbon persistence under long rotation was strongest, which was beneficial to maintaining carbon stability during each rotation. Under good site conditions (site index (SI) = 27), the shorter the rotation was, the more severely the soil fertility was consumed. In order to have persistent carbon sequestration rates in Chinese fir plantations, we suggest that rotation should be longer than 25 years. Application of FORECAST model can help quantitatively assess carbon sequestration capacity of forest plantations, which varies under different management strategies.

Key words FORECAST model; ecological rotation; carbon sequestration; soil available nitrogen; sustainable management

Citation: Wang WF, Duan YX, Zhang LX, Wang B, Li XJ (2016). Effects of different rotations on carbon sequestration in Chinese fir plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 669–678. doi: 10.17521/cjpe.2015.0407

在全球气候变化背景下, 人工林的适应性管理成为学术界关注的热点领域(Bravo *et al.*, 2013)。为了改善生态环境, 我国实施了一系列重大林业生态工程, 使我国的森林覆盖率从20世纪80年代的16%增加到21.63% (2009–2013年第八次全国森林资源清查), 有力地促进了森林资源的发展, 特别是人工林资源得到了快速的增长, 在改善区域生态环境方面起到了积极的作用。目前, 我国的人工林面积占全球人工林面积的73%, 人工林保存面积居全球第一(魏晓华等, 2015)。然而, 大面积的人工造林也存在一些生态问题, 如森林质量差、病虫害加剧、生物多样性减少、水土保持功能下降等(Wang *et al.*, 2013)。土地利用历史、树种组成、群落结构、整地、采伐和施肥等人工林经营管理水平, 会对林木生产力、土壤碳循环等产生作用, 影响到土壤有机碳固定、储存和排放, 从而影响人工林植被和土壤在减缓全球气候变化中的效应(冯瑞芳等, 2006)。

目前, 关于纯林连栽导致地力衰退及生产力下降的研究国内外都有相关报道(林光耀等, 2001; 盛炜彤和范少辉, 2002; 何宗明等, 2003), 国外主要研究了欧洲云杉(*Picea abies*)、*Pinus radiata*、火炬松(*Pinus taeda*)、湿地松(*Pinus elliottii*)等, 国内主要研究了杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、桉(*Eucalyptus robusta*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)和杨树(*Populus* spp.)等, 研究人员从人工林群落结构、土壤微生物种群区系、土壤理化性质、栽培措施等方面, 分析了人工林地力衰退的原因, 提出了调整林分结构、保护林下植被、树种混交、林地施肥、凋落物利用、科学营林等措施防止地力衰退(Wei *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2004; 陈莉莎等, 2014; 肖欣等, 2015)。以我国亚热带区域为例, 该地区大面积营造的杉木纯林多代连栽, 出现了地力衰退等生态问题, 科学的经营管理可从一定程度上缓解这种状况(盛炜彤等, 2004)。以往研究大都基于自然状态下的固碳现状, 而对经营管理措施的改变如何影响人工林碳固存缺乏深入研究。

轮伐期是林木培育过程中培育符合目的林木的生产周期, 它影响森林调整的可能性, 从而也影响森林的龄级分布, 确定合理轮伐期是森林经营的首要任务(Peng *et al.*, 2002)。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(马祥庆等, 2000; 孙冬婧, 2011)。关于碳固存的可持续性方面, 由于技术、时间、人力和资金等因素限制, 研究时间跨度较小。尽管学界通常对基于复杂过程的模型模拟效果及其在生态学研究中的应用有不同的态度, 认为模型模拟存在一定的不确定性, 但基于大数据的混合模型由于其技术优势近年来得到广泛应用(王伟峰等, 2016)。由加拿大Kimmins等(2007)开发的FORECAST模型就是模型技术应用于森林可持续经营的典范, 目前, 该模型已在世界上主要森林类型中得到广泛应用, 被认为是模拟森林经营管理能力较强的模型, 加拿大、美国、英国、西班牙、中国等国已应用该模型进行了相关研究(Welham *et al.*, 2007; Blanco & González, 2010; Wang *et al.*, 2013; 田晓等, 2014)。本研究应用FORECAST模型评估不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响, 有利于深入了解人工林生态系统的固碳可持续性, 为其可持续经营提供科学依据。

1 研究区概况

杉木分布遍及中国整个亚热带, 栽培区域达16个省区。东自浙江、福建及台湾山区, 西至云南、四川盆地西缘及安宁河流域, 南自广东中部和广西中南部, 北至秦岭南麓、桐柏山、大别山, 102°–122°E、22°–34°N都有分布。杉木垂直分布的幅度随纬度和地形而变化。中心产区主要分布于海拔800–1 000 m以下的丘陵山地; 南部和西部山区的分布较高, 在峨眉山达海拔1 800 m, 云南东部会泽达海拔2 900 m; 东部及北部的分布较低, 一般在海拔600–800 m以下, 个别地区可达到1 000 m左右。分布区内的年平均气温为15–20 °C, 年降水量800–2 000 mm。杉木较喜光, 但幼时稍能耐侧方蔽阴。对土壤的要求较高, 最适宜肥沃、深厚、疏松、排水良好的土壤, 在土壤瘠薄、板结及排水不良的立地生长较差。产区主要土壤类型为黄壤、红壤, 以黄壤条件较好(盛炜彤等, 2005)。本研究用于FORECAST模型验证的野外观测样地主要分布在杉木中心产区之一的江西省, 包括上饶市德兴、九江市武宁、宜春市铜鼓、抚州市乐安、吉安市永丰、赣州市崇义等, 植被主要有杉木、杨桐(*Adinandra millettii*)、木荷(*Schima superba*)、欏木(*Loropetalum chinense*)、南烛(*Vaccinium bracteatum*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、木姜子(*Litsea*

pungens)、野漆(*Toxicodendron succedaneum*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)等。

2 研究方法

通常认为, 森林碳固存的监测和模拟是两个相对独立的过程, 事实上, 精确验证的现代模拟技术可对不同尺度复杂动态系统的碳固存进行模拟, 对森林资源监测工作具有重要意义(Seely *et al.*, 2002; Kimmins *et al.*, 2007)。本研究采用的是基于样地调查和模型模拟相结合的方法, 以24块杉木人工林野外实测样地为基础(分不同龄级, 每块样地的水平投影面积为800 m²), 通过林分测定获得优势木高、优势木胸径、地上生物量、地被物量等。野外观测数据主要用于FORECAST模型的验证, 在模型验证的基础上, 模拟不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响。

2.1 FORECAST模型简介

FORECAST模型是基于混合模型原理而开发的, 该模型充分结合了过程模型和机理模型的优势, 建立在整个森林生态系统的物质生产和养分循环规律之上。研究表明, 一个森林生态系统的生产力大小取决于该系统的叶量和光合效率。对某一树种, 光合效率的高低取决于光照条件和叶氮含量两个因素。叶氮含量由生态系统养分循环状况决定, 是一个能反映系统的物质生产、养分循环及环境状况的综合性指标。因此, FORECAST模型的驱动机制就是叶氮效率(foliage nitrogen efficiency, *FNE*), 它从输入的基础数据中计算获得(Kimmins *et al.*, 1999, 2008)。该模型的参数可以分为必需参数和非必需参数, 与植物生长、土壤养分等相关的参数为必需参数, 其他参数(如坡面渗漏、矿物质风化、生物固氮等)可采用系统的默认值或相近区域的数据, 非必需参数的缺省不会对模型结果产生实质影响。在模型中, 系统可以创建3种立地条件(好、中、差)并用立地指数(*SI*)表示。以杉木人工林为例, 通过不同立地条件下的树高生长数据, 用模型可拟合相应的生长过程, *SI* = 17、21、27分别代表差、中、好3种立地条件下的优势木平均高(基准年龄为50年), 通过不同的立地条件和林分生长特征相耦合, 模拟不同经营管理措施对杉木人工林碳固存的影响。

2.2 模拟情景设置

为了增强结果的对比性, 通过野外观测并结合文献资料, 模拟情景设置为差立地和好立地条件(*SI*

= 17、27), 轮伐期分别为15年(短轮伐期)、25年(正常轮伐期)、50年(长轮伐期), 造林密度为2 500 trees·hm⁻², 模拟时间跨度为150年(分别对应10、6、3个完整的轮伐期)。

2.3 相关参数定义

为了研究不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响, 定义以下参数作为分析依据:

地上生物量碳(ABCS): 指乔木层的树干、树皮、树枝、树叶等固碳量;

地下生物量碳(UBCS): 指地下根系(粗根、中根和细根)的固碳量;

总生物量碳(TBCS): 指地上生物量碳与地下生物量碳之和, $TBCS = ABCS + UBCS$;

土壤有机碳(SOC): 指地上凋落物和土壤有机质(通过微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的总称)中的固碳量;

总固碳量(TCS): 总生物量碳与土壤有机碳之和, $TCS = TBCS + SOC$

3 FORECAST模型的校准和验证

3.1 FORECAST模型的校准

FORECAST模型参数在Bi等(2007)、Wei和Blanco(2014)构建的数据库基础上进行了部分调整, 调整的依据是通过野外调查对非必需参数的缺省值进行了完善, 使模型系统参数值更能反映出亚热带区域杉木人工林的林分结构特征和土壤养分循环过程。模型校准参考了《杉木林生态系统学》(田大伦等, 2003)、《中国生态系统定位观测与研究数据集: 湖南会同杉木林站(1982–2009)》(田大伦, 2011)和《杉木人工林长期生产力保持机制研究》(盛炜彤等, 2005), 校准数据主要包括树木生物量、各组分营养浓度(树干、树皮、树枝、树叶、树根)、林分密度、光响应曲线、树高、林冠结构、土壤养分输入、凋落物分解速率等(Kimmins *et al.*, 1999)。应用FORECAST模型模拟杉木人工林时需要校准的主要参数见表1。

3.2 FORECAST模型的验证

模型验证参考了Blanco等(2007)提出的FORECAST模型评价方法, 用来验证的数据主要来自野外观测数据($n = 96$), 这些数据是基于不同立地条件下的杉木人工林年龄序列数据, 主要包括优势木树高、优势木胸径、地上生物量和地被物量。为

表1 校准FORECAST模型的主要参数
Table 1 Values used to calibrate FORECAST major parameters

主要参数 Major parameters	立地条件好 Rich site condition (SI = 27)	立地条件差 Poor site condition (SI = 17)
氮浓度(新叶/老叶/死叶) Nitrogen concentration in leaves (young/old/dead) (%)	1.53 / 1.36 / 1.13	1.21 / 1.11 / 0.93
氮浓度(茎边材/茎心材) Nitrogen concentration in stems (sapwood/heartwood) (%)	0.14 / 0.03	0.12 / 0.03
氮浓度(活树皮/死树皮) Nitrogen concentration in barks (live/dead) (%)	0.44 / 0.27	0.37 / 0.24
氮浓度(活树枝/死树枝) Nitrogen concentration in branches (live/dead) (%)	0.67 / 0.52	0.55 / 0.47
氮浓度(根边材/根心材) Nitrogen concentration in root (sapwood/heartwood) (%)	0.37 / 0.06	0.35 / 0.06
氮浓度(活细根/死细根) Nitrogen concentration in fine roots (live/dead) (%)	1.17 / 0.97	0.96 / 0.79
遮阴的叶最大生物量 Shading by maximum foliage biomass (% , full light)	8	30
占据土壤体积最大的细根生物量 Soil volume occupied at maximum fine root biomass (%)	100	95
根获取氮的效率 Efficiency of N root capture (%)	98	100
保留时间(新叶/老叶/枯死枝) Retention time for young/old foliage/dead branches (a)	1 / 2 / 40	1 / 2 / 40
细根周转 Fine roots turnover (a)	0.95	1.35
边材分解率 Decomposition rates of sapwood (by litter age) (%·a ⁻¹)	1–5 a (2.0); 6–10 a (10.0); 11–15 a (30.0); 16–20 a (20.0); >20 a (4.0)	
心材分解率 Decomposition rates of heartwood (%·a ⁻¹)	1–10 a (0.4); 11–15 a (10.0); 16–25 a (15.0); 25–40 a (10.0); >40 a (2.0)	
树皮分解率 Decomposition rates of bark (%·a ⁻¹)	1–5 a (2.0); 6–20 a (12.0); 20–40 a (20.0); >40 a (4.0)	
树枝和粗根分解率 Decomposition rates of branches and large roots (%·a ⁻¹)	1–5 a (10.0); 6–10 a (45.0); 11–15 a (35.0); >15 a (4.0)	
针叶分解率 Decomposition rates of needles (%·a ⁻¹)	1–2 a (27.0); 3–5 a (30.0); 6–10 a (40.0); >10 a (3.0)	
细根分解率 Decomposition rates of fine roots (%·a ⁻¹)	1–2 a (30.0); 3–4 a (50.0); >4 a (9.0)	

SI, 立地指数。
SI, site index.

了评价模型的表现性, 用平均偏差、平均绝对偏差、预测值与观测值进行线性回归拟合后得到的皮尔森相关系数(*r*)等进行比较。此外, 还计算了两个不同的指标, 第一个指标是Theil不等式系数(*U*):

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=q}^n D_i}{\sum_{i=1}^n Observed_i^2}} \tag{1}$$

其中, *D_i*为观测值*i*与预测值*i*之间的差值; *n*是数据的个数; *U* ∈ [0, ∞), 如果*U* = 0则表示模型的预测效果很好, *U*值越大模型的预测效果越差;

第二个指标是模型效率(*ME*):

$$ME = 1 - \frac{\sum D_i^2}{\sum (Observed_i - predicted)^2} \tag{2}$$

如果*ME* = 1, 表明模型表现很好, *ME* = 0表明模型并不比一个简单的平均值表现好, 如果*ME*为负值表明模型的性能较差。

最后, 计算了两个不同置信水平上的临界误差(*e*), 具体计算结果见表2。

4 结果分析

4.1 不同轮伐期对总生物量碳的影响

如图1所示, 采用15、25和50年3种不同的轮伐期, 其150年间的总生物量碳存在差异性。在差立地条件下(*SI* = 17, 下同), 总生物量碳分别为203.88、198.42和154.44 Mg·hm⁻², 采用短轮伐期(15年)收获方式的总生物量碳分别是正常轮伐期(25年)的1.03倍和长轮伐期(50年)的1.32倍; 在好的立地条件下(*SI* = 27, 下同), 总生物量碳分别为501.65、517.62和329.88 Mg·hm⁻², 采用短轮伐期收获方式的总生物量碳分别是正常轮伐期的0.97倍和长轮伐期的1.52倍。无论立地条件如何, 在150年间短轮伐期和正常轮伐期在总生物量碳方面差异较小(2.7%–3.1%), 即采用短轮伐期模式对生物量碳积累的长

表2 FORECAST模型预测杉木人工林相关指标与野外实测数据的比较
Table 2 Comparison of FORECAST model simulation with field data in Chinese fir plantations

指标 Index	优势木高 Top height	优势木胸径 Dominant DBH	地上生物量 Total tree biomass	地被物量 Ground cover biomass
平均偏差 Average bias	0.66 m	-0.47 cm	-5.89 Mg·hm ⁻²	0.01 Mg·hm ⁻²
平均绝对偏差 Mean absolute deviation	1.01 m	0.98 cm	11.38 Mg·hm ⁻²	0.59 Mg·hm ⁻²
皮尔森系数 Pearson's <i>r</i>	0.97	0.96	0.95	0.82
泰尔系数 Theil's <i>r</i>	0.07	0.07	0.13	0.21
模型效率 Modeling efficiency	0.96	0.92	0.95	0.85
最大可信度 Relaxed <i>e</i> * ($\alpha = 0.05$)	1.63 m	1.69 cm	21.91 Mg·hm ⁻²	1.03 Mg·hm ⁻²
最小可信度 Exigent <i>e</i> * ($\alpha = 0.20$)	1.23 m	1.27 cm	15.94 Mg·hm ⁻²	0.78 Mg·hm ⁻²

*e**, 雷诺兹临界误差。
DBH, diameter at breast height; *e**, value of Reynolds (1984) critical error at two different levels of confidence (95% and 80%).

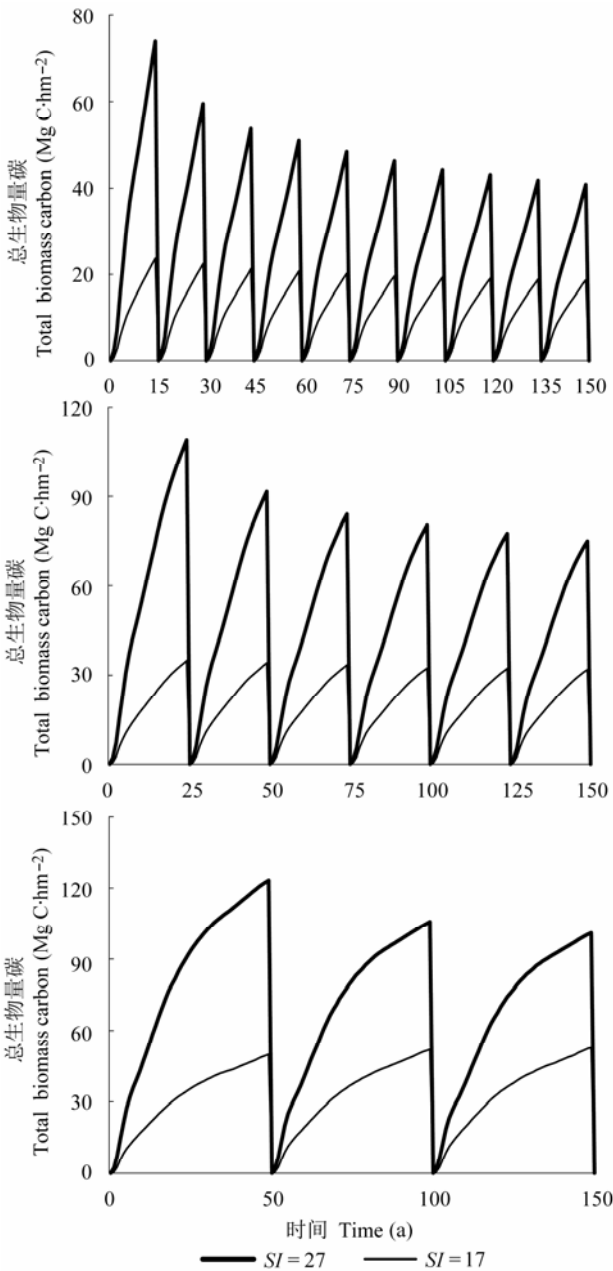


图1 轮伐期对总生物量碳的影响。
Fig. 1 Effect of rotation on total biomass carbon. SI, site index.

期影响在总量上不占优势,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。轮伐期越长总生物量碳越少,这是由于轮伐期延长减少了收获的次数导致。采用不同的轮伐期,差的立地每个轮伐期都可以保持相对稳定的生物量碳,而好的立地会呈现固碳量下降的情况,并且轮伐期越短,下降的幅度越明显,这与FORECAST模型的立地选择有关,该模型假设了差立地是土壤养分非常亏缺的林地,需要通过林火(自然火烧或人工控制)、凋落物分解等方式完成林地养分的原始积累,通过长期的造林活动可有效地维持林地的养分循环。而好的立地养分相对充足,每个轮伐期收获的碳从一定程度上消耗了林地养分,只是不同轮伐期消耗的程度存在差异,短轮伐期要比长轮伐期更明显。轮伐期越短,每采伐单位杉木干物质所带走的养分越多,对地力的消耗越严重。同时,短轮伐期还会增加林地的干扰频率,不利于杉木林下植被发育,增加了土壤的扰动,因此应适当延长长轮伐期,给林地以一定的养分生态恢复周期,减缓人工林经营对林地的干扰(马庆祥等, 2000)。

4.2 不同轮伐期对总固碳量、平均年固碳量和每个轮伐期固碳量的影响

如图2所示,在差的立地条件下,150年间采用不同轮伐期对总固碳量的影响依次为:短轮伐期(15年, 360.88 Mg·hm⁻²) >正常轮伐期(25年, 307.29 Mg·hm⁻²) >长轮伐期(50年, 224.44 Mg·hm⁻²),采用短轮伐期收获方式的总固碳量分别是正常轮伐期的1.17倍和长轮伐期的1.61倍。而采用不同轮伐期的土壤有机碳分别为157.00、108.87和70.00 Mg·hm⁻²。如图3所示,在好的立地条件下,150年间采用不同

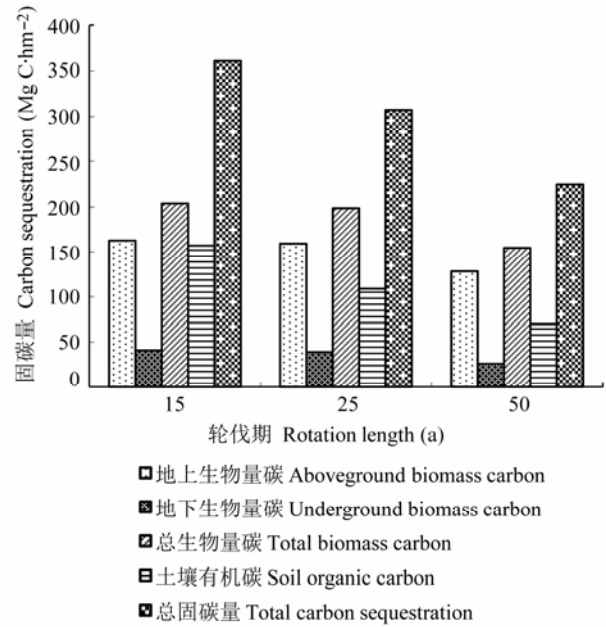


图2 轮伐期对总固碳量的影响($SI = 17$)。SI, 立地指数。
Fig. 2 Effect of rotation on total carbon sequestration ($SI = 17$). SI, site index.

轮伐期对总固碳量的影响与差的立地规律较为一致, 15年轮伐期为 $838.97 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 25年轮伐期为 $744.63 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 50年轮伐期为 $462.48 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。采用不同轮伐期的土壤有机碳分别为 337.31 、 227.01 和 $132.60 \text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

如表3所示, 在平均年固碳量方面, 无论立地条件如何, 采用不同轮伐期其生物量碳和土壤有机碳总体上的变化趋势是随着轮伐期的延长不断降低, 这是由于杉木林固碳动态特征可分为固碳功能建立、固碳能力迅速增长、固碳能力最大、固碳能力相对平稳和固碳能力下降5个阶段(姚利辉等, 2015), 不同的轮伐期对固碳动态特征有一定的影响, 短轮伐期为固碳能力迅速增长的阶段, 但由于林分分化过程尚未完成, 林分竞争和凋落物较少等综合因素, 对立地的消耗较为严重; 而长轮伐期为固碳能力下

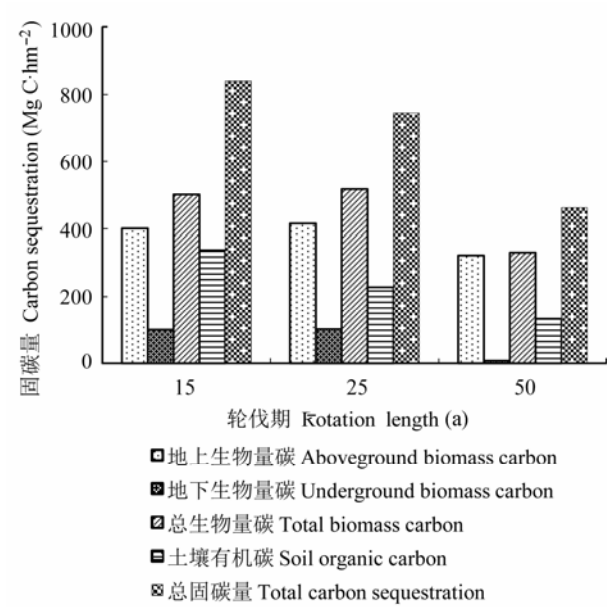


图3 轮伐期对总固碳量的影响($SI = 27$)。SI, 立地指数。
Fig. 3 Effect of rotation on total carbon sequestration ($SI = 27$). SI, site index.

降的过程, 但由于凋落物积累和林下植被发育的影响, 对立地的恢复较为有利。在每个轮伐期固碳量方面, 无论立地条件如何, 采用不同轮伐期其生物量碳和土壤有机碳总体上的变化趋势是随着轮伐期延长不断增加, 这是由于在一个完整的轮伐期内, 林分组成结构会不断变化, 如胸径、树高、林下植被发育、凋落物等, 轮伐期越长, 生长周期越长, 林分固碳量越高。其中, 采用不同轮伐期的好的立地的总生物量碳、土壤有机碳均是差的立地的2.0–2.5倍。因此, 杉木人工林的平均年固碳能力和每个轮伐期的固碳能力不仅受不同生长阶段生物学特性的制约, 而且还受林分组成结构和土壤肥力条件的影响。枯落物层虽然碳固存不高, 但在森林生态系统碳循环过程中具有重要意义, 它实现了碳素从植被碳库向土壤碳库的转移, 是土壤碳库中碳固存的主

表3 轮伐期对平均年固碳量和每个轮伐期固碳量的影响
Table 3 Effect of rotation on annual average carbon sequestration and each rotation carbon sequestration

轮伐期 Rotation (a)	平均年固碳量 Mean annual carbon sequestration ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)										每个轮伐期固碳量 Each rotation carbon sequestration ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)									
	ABCS		UBCS		TBCS		SOC		TCS		ABCS		UBCS		TBCS		SOC		TCS	
	SI = 17	SI = 27	SI = 17	SI = 27	SI = 17	SI = 27	SI = 17	SI = 27	SI = 17	SI = 27	SI = 17	SI = 27	SI = 17	SI = 27	SI = 17	SI = 27	SI = 17	SI = 27	SI = 17	SI = 27
15	1.08	2.68	0.27	0.67	1.36	3.34	1.05	2.25	2.41	5.59	16.30	40.13	4.11	10.00	20.40	50.17	15.70	33.70	36.10	83.90
25	1.06	2.77	0.26	0.68	1.32	3.45	0.73	1.51	2.05	4.96	26.50	69.36	6.53	16.90	33.10	86.27	18.10	37.80	51.20	124.00
50	0.86	2.15	0.17	0.05	1.03	2.20	0.47	0.88	1.50	3.08	42.80	107.30	8.73	2.69	51.50	110.00	23.30	44.20	74.80	154.00

ABCS, 地上生物量碳; SI, 立地指数; SOC, 土壤有机碳; TBCS, 总生物量碳; TCS, 总固碳量; UBCS, 地下生物量碳。
ABCS, aboveground biomass carbon; SI, site index; SOC, Soil organic carbon; TBCS, total biomass carbon; TCS, total carbon sequestration; UBCS, underground biomass carbon.

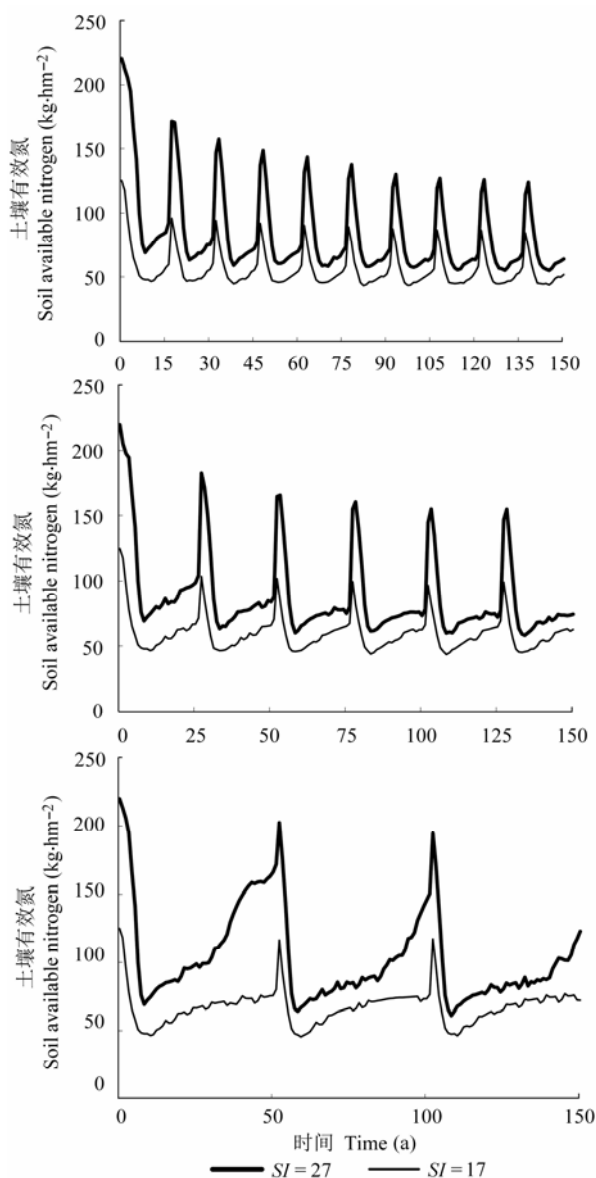


图4 轮伐期对土壤有效氮的影响。SI, 立地指数。

Fig. 4 Effect of rotation on soil available nitrogen. SI, site index.

要来源。

4.3 不同轮伐期对土壤有效氮的影响

由图4所示, 不同立地条件下, 轮伐期长短对土壤有效氮含量有一定影响。在好的立地上, 采用15年轮伐期, 前5个轮伐期土壤有效氮含量较高, 下降也较快; 从第6个轮伐期开始逐渐趋于稳定。采用25年轮伐期, 前2个轮伐期土壤有效氮减少较多, 但从第3个轮伐期开始趋于稳定, 下降幅度小于15年轮伐期。采用50年轮伐期, 每个轮伐期的土壤有效氮含量均高于25年的和15年的, 50年轮伐期的土壤有效氮含量在各轮伐期之间变化较小, 这表明延长轮

伐期土壤有效氮可以得到明显恢复, 有利于立地生产力的维持。同时, 人工造林有利于改善差的立地条件, 不同轮伐期的选择会影响杉木人工林的氮循环过程。在采伐强度一定的情况下, 土壤有效氮含量在长轮伐期下最大, 并且随着轮伐期的缩短而减小, 随着轮伐期的延长, 凋落物形式的氮的年归还量也逐渐增大。因此, 轮伐期的长短对杉木人工林氮循环过程具有重要影响, 短轮伐期会导致土壤有效氮含量下降, 氮吸收量降低, 淋溶损失增加, 从而破坏土壤肥力, 造成碳固存的下降(Jiang *et al.*, 2002; Peng *et al.*, 2002; 辛赞红等, 2011)。此外, 杉木人工林土壤中的氮含量相对较高, 而磷含量较为缺乏, 为了达到土壤中磷的相对平衡, 在土壤C:P较低的情况下土壤微生物体有机磷会出现净矿化现象。土壤C:N和C:P主要受土壤有机碳的影响, 因此在杉木人工林经营管理过程中如何调控土壤有机碳含量很关键(曹娟等, 2015)。

5 讨论和结论

合理轮伐期是衡量林木收获时间的重要指标, 以经济收益为前提时, 期望缩短轮伐期; 而以生态效益为前提时, 期望延长轮伐期, 充分发挥森林的生态服务功能。因此, 需要科学平衡两者之间的关系。从经济角度出发, 根据不同立地条件和培育目标, 确定的杉木人工林轮伐期为14–28年(揭建林等, 2000), 主伐年龄为20–24年(施新程等, 2009)。在生产实践中, 更倾向于选择短轮伐期作业模式, 这主要由经济利益决定, 缺乏人工林固碳可持续性的理念。Wei等(2003)基于FORECAST模型评估了不同轮伐期对欧洲黑松(*Pinus nigra*)的影响, 以茎干采伐量为指标, 研究表明长轮伐期有利于保持长期立地生产力, 短轮伐期对森林生态系统的干扰频率较大, 需要较长的恢复时间, 易引起未来生产力的下降。Seely等(2008)以云杉(*Picea asperata*)、山杨(*Populus davidiana*)、欧洲黑松为例, 应用FORECAST模型模拟了不同树种300年间的变化趋势, 表明短轮伐期导致总固碳量的大幅下降, 土壤有机碳损失最多。Wang等(2013)也基于FORECAST模型对阔叶人工闽楠(*Phoebe bournei*)林的轮伐期进行了研究, 发现轮伐期长短直接影响阔叶林的凋落物积累, 对土壤的养分归还还具有重要作用。以上研究都表明不同树种、经营目标等与轮伐期选择有密切关系, 本研究

进一步验证了以上结论。因此, 杉木人工林的经营要选择合理的轮伐期, 适当延长轮伐期有利于改变林内生态环境、促进林下植被生长、提高群落的生物多样性, 可避免因轮伐期短造成的地力衰退及水土流失, 具有良好的生态经济效益。特别是人工促进林下植被更新可对土壤养分循环起到一定的作用(卢妮妮等, 2015), 生长期的延长和加快凋落物的分解等(郭骑等, 2014), 都对杉木林地力恢复和可持续经营具有重要意义。同时, 由于杉阔混交人工林能充分利用立地, 在植被和土壤碳固存能力方面比杉木人工纯林高, 但在生产实践中只有数量较少的杉木人工林是多树种混交经营, 主要原因是混交人工林的经营管理比纯林要复杂得多, 今后要重视杉阔混交林的营造, 提高人工林的碳固存能力(Nichols *et al.*, 2006; 罗云建和张小全, 2007; 周静等, 2015)。

为描述轮伐期对人工林地力可持续性的影响, 可用“生态轮伐期”的概念加以说明, 生态轮伐期是指为了维护人工林立地生产力的可持续性而选择的最小轮伐周期, 它强调木材收获持续、碳固存持久和土壤养分循环, 从时间和空间维度上实现三者的统一, 可使用FORECAST模型进行评估。以杉木人工林为例, 其碳固存能力为可持续生产力下的碳固存能力与目前森林经营下的碳固存能力之差。可持续生产力下的碳固存能力反映了未来实施可持续经营管理措施可以实现的最大固碳量, 而目前森林经营下的固碳能力是人工林经营的现实固碳能力(魏晓华等, 2015)。因此, 应用FORECAST模型可定量评估人工林的碳固存能力, 且该固碳能力是基于不同经营管理措施下的可持续固碳能力, 本研究的轮伐期管理只是其中一种典型情景, 该模型还可评估造林密度、人工抚育、施肥、采伐剩余物处理、树种混交等生产实践中常见的经营措施对碳固存的影响(Wei & Blanco, 2014)。此外, 本研究是在野外观测和模型模拟相结合的基础上进行的, 从而保证了空间尺度上的一致性和时间尺度上的连续性, 克服了“空间换时间”研究方法的缺陷, 较为客观地反映了林分在不同轮伐期下的固碳能力及其固碳动态过程。与所有模型一样, FORECAST模型在应用中也存在一定的局限性。例如, 该模型中许多土壤过程的表示相对简单, 土壤范围、土壤混合和根分配表示的缺乏限制了模型解决土壤压实和侵蚀问题的能力。此外, 模型中水分对植被生长的影响也考虑不

足, 只是将水分作为养分吸收的一个限制因子, 这些问题的解决有待于对模型系统进一步的完善(Kimmins *et al.*, 1999)。

研究表明, 随着杉木连栽代数的增加, 土壤有机质含量不断下降, 腐殖质活化度减少。短轮伐期(15年)在150年间的总固碳量较高, 但固碳持久性较低, 每个轮伐期之间的固碳量下降幅度较大, 是一种不可持续的经营模式; 正常轮伐期(25年)和长轮伐期(50年)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。轮伐期越短, 对地力消耗影响越大。为了实现杉木人工林的固碳可持续性, 建议其生态轮伐期选择在25年以上。此外, 本研究只是讨论了轮伐期管理一种情景, 在生产实践中, 杉木人工林的经营管理存在多情景交互作用(如杉阔混交、林农间作、氮沉降作用等), 这些科学问题有待进一步深入研究。

基金项目 内蒙古自然科学基金博士基金(2015-BS0323)。

致谢 本研究在FORECAST模型校准与验证方面得到了加拿大University of British Columbia魏晓华教授、西班牙Universidad Pública de Navarra Blanco JA博士的帮助, 在野外调查方面得到了江西农业大学林学院刘苑秋教授、欧阳勋志教授的帮助, 在此表示感谢。

参考文献

- Bi J, Blanco JA, Seely B, Kimmins JP, Ding Y, Welham C (2007). Yield decline in Chinese fir plantations: A simulation investigation with implications for model complexity. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 1615–1630.
- Blanco JA, González E (2010). Exploring the sustainability of current management prescriptions for *Pinus caribaea* plantations in Cuba: A modelling approach. *Journal of Tropical Forest Science*, 22, 139–154.
- Blanco JA, Seely B, Welham C, Kimmins JP, Seebacher TM (2007). Testing the performance of a forest ecosystem model (FORECAST) against 29 years of field data in a *Pseudotsuga menziesii* plantation. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 1808–1820.
- Bravo F, Lemay V, Jandl R, Gadow KV (Translated by Wang XP, Yang XH, Liu JL, Zhou CX, He GM) (2013). *Forest Ecosystem Management Under Climate Change Challenge*. Higher Education Press, Beijing. 4–6. (in Chinese) [Bravo F, Lemay V, Jandl R, Gadow KV (王小平, 杨晓晖, 刘晶岚, 周彩贤, 何桂梅 (译)) (2013). 气候变化挑战下的森林生态系统经营管理. 高等教育出版社, 北京. 4–6.]
- Cao J, Yan WD, Xiang WH, Chen XY, Lei PF (2015).

- Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of Chinese fir plantations at three different ages in Huitong, Hunan Province, China. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(7), 1–8. (in Chinese with English abstract) [曹娟, 闫文德, 项文化, 谌小勇, 雷丕锋 (2015). 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征. 林业科学, 51(7), 1–8.]
- Chen LS, Zhang JC, Lu Q, Si DY, Zhuo WJ, Li MH, Li SC (2014). Effects of continuous planting of poplars on soil biological activity and nutrients. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 38(5), 85–90. (in Chinese with English abstract) [陈莉莎, 张金池, 陆茜, 司登宇, 卓为君, 李梅花, 李世昌 (2014). 杨树多代连作对土壤养分特征和生物活性的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 38(5), 85–90.]
- Feng RF, Yang WQ, Zhang J (2006). Artificial forest management for global change mitigation. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 3870–3877. (in Chinese with English abstract) [冯瑞芳, 杨万勤, 张健 (2006). 人工林经营与全球变化减缓. 生态学报, 26, 3870–3877.]
- Guo Q, Wang XJ, Yi XD (2014). Correlation of understory biomass and soil under *Cunninghamia lanceolata* pure forest of different age. *Journal of Northeast Forestry University*, 42(3), 85–88, 98. (in Chinese with English abstract) [郭琦, 王新杰, 衣晓丹 (2014). 不同林龄杉木纯林林下生物量与土壤理化性质的相关性. 东北林业大学学报, 42(3), 85–88, 98.]
- He ZM, Fan SH, Chen QS, Yang X, Ying JH (2003). Effects of site management measures on growth of 4-year-old, second-rotation Chinese fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 39(4), 54–58. (in Chinese with English abstract) [何宗明, 范少辉, 陈清山, 杨旭, 应金花 (2003). 立地管理措施对2代4年生杉木林生长的影响. 林业科学, 39(4), 54–58.]
- Jiang H, Apps MJ, Peng CH (2002). Modeling the influence of harvesting on Chinese boreal forest carbon dynamics. *Forest Ecology and Management*, 169, 65–68.
- Jie JL, Zan YS, Wu KX (2000). Study on reasonable rotation of Chinese fir plantation in Jiangxi Province. *Journal of Jiangxi Forestry Science and Technology*, (6), 4–8. (in Chinese with English abstract) [揭建林, 詹有生, 吴克选 (2000). 江西省杉木人工林合理轮伐期的研究. 江西林业科技, (6), 4–8.]
- Kimmins JP, Blanco JA, Seely B, Welham C, Scoullar K (2008). Complexity in modelling forest ecosystems: How much is enough? *Forest Ecology and Management*, 256, 1646–1658.
- Kimmins JP, Mailly D, Seely B (1999). Modelling forest ecosystem net primary production: The hybrid simulation approach used in FORECAST. *Ecological Modelling*, 122, 195–224.
- Kimmins JP, Rempel RS, Welham C, Seely B (2007). Biophysical sustainability, process-based monitoring and forest ecosystem management decision support systems. *The Forestry Chronicle*, 83, 502–514.
- Lin GY, Fan SH, He ZM, Yang XJ, Ying JH, Lu ST (2001). A study on the influence of site management measures on the growth of 3-year-old *Cunninghamia lanceolata* plantation of second-generation. *Forest Research*, 14, 403–407. (in Chinese with English abstract) [林光耀, 范少辉, 何宗明, 杨旭静, 应金花, 卢善土 (2001). 不同立地管理措施对2代杉木人工林3年生林分生长影响的研究. 林业科学研究, 14, 403–407.]
- Lu NN, Gao ZX, Zhang P, Xu XL, Wang XJ (2015). Path analysis between soil properties and undergrowth vegetation in pure Chinese fir Forest. *Journal of Northeast Forestry University*, 43(7), 73–77. (in Chinese with English abstract) [卢妮妮, 高志雄, 张鹏, 徐雪蕾, 王新杰 (2015). 杉木纯林土壤性质与林下植被的通径分析. 东北林业大学学报, 43(7), 73–77.]
- Luo YJ, Zhang XQ (2007). The assessment of soil degradation in successive rotations of Chinese fir plantation and the soil amelioration of mixed plantation of Chinese fir and broad-leaved. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 715–724. (in Chinese with English abstract) [罗云建, 张小全 (2007). 杉木(*Cunninghamia lanceolata*)连栽地力退化和杉阔混交林的土壤改良作用. 生态学报, 27, 715–724.]
- Ma XQ, Ye SJ, Chen SS (2000). Effects of rotation on site productivity maintenance of Chinese fir plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 36(6), 47–52. (in Chinese with English abstract) [马祥庆, 叶世坚, 陈绍栓 (2000). 轮伐期对杉木人工林地力维护的影响. 林业科学, 36(6), 47–52.]
- Nichols JD, Bristow M, Vanclay JK (2006). Mixed-species plantations: Prospects and challenges. *Forest Ecology and Management*, 233, 383–390.
- Peng CH, Jiang H, Apps MJ, Zhang YL (2002). Effects of harvesting regimes on carbon and nitrogen dynamics of boreal forests in central Canada: A process model simulation. *Ecological Modelling*, 155, 177–189.
- Seely B, Hawkins C, Blanco JA, Welham C, Kimmins JP (2008). Evaluation of a mechanistic approach to mixed-wood modeling. *The Forestry Chronicle*, 84, 181–193.
- Seely B, Welham C, Kimmins JP (2002). Carbon sequestration in a boreal forest ecosystem: Results from the ecosystem simulation model, FORECAST. *Forest Ecology and Management*, 169, 123–135.
- Sheng WT, Fan SH (2002). Impact of growth and development characters of Chinese fir and its plantation on the long-term site productivity. *Forest Research*, 15, 629–636. (in Chinese with English abstract) [盛炜彤, 范少辉 (2002). 杉木及其人工林自身特性对长期立地生产力的影响. 林业科学研究, 15, 629–636.]
- Sheng WT, Fan SH (2005). *Mechanism Study of Productivity Keeping for a Long Time of Chinese Fir Plantation*. Science Press, Beijing. 15–68. (in Chinese) [盛炜彤, 范少辉 (2005). 杉木人工林长期生产力保持机制研究. 科学出版社, 北京. 15–68.]
- Sheng WT, Hui GY, Zhang SG (2004). *Optimization Cultivation*

- Mode of Chinese Fir Plantation*. Chinese Science and Technology Press, Beijing. 23–27. (in Chinese) [盛炜彤, 惠刚盈, 张守攻 (2004). 杉木人工林优化栽培模式. 中国科学技术出版社, 北京. 23–27.]
- Shi XC, Wang HY, Huang WZ, Yan HX (2009). Study on the cutting age of Chinese fir plantation in the Southern area of Henan Province. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 36(3), 49–53. (in Chinese with English abstract) [施新程, 王洪友, 黄旺志, 鄢洪星 (2009). 豫南杉木人工林主伐年龄研究. 福建林业科技, 36(3), 49–53.]
- Sun DJ (2011). *The Effects on Biomass, Species Diversity and Soil Fertility of Cunninghamia lanceolata Plantation by Intermediate Cuttings and Interplanted with Broad-leaved Tree*. Master degree dissertation, Guangxi University, Nanning. 27–32. (in Chinese with English abstract) [孙冬婧 (2011). 间伐和套种阔叶树对杉木人工林生物量、物种多样性及地力的影响. 硕士学位论文, 广西大学, 南宁. 27–32.]
- Tian DL (2011). *Observation and Research Data Sets of Chinese Ecosystem: Chinese Fir Eco-station in Huitong, Hunan (1982–2009)*. Chinese Agriculture Press, Beijing. 13–87. (in Chinese) [田大伦 (2011). 中国生态系统定位观测与研究数据集: 湖南会同杉木林站(1982–2009). 中国农业出版社, 北京. 13–87.]
- Tian DL, Kang WX, Wen SZ (2003). *Ecosystemology of Chinese Fir Forest*. Science Press, Beijing. 22–59. (in Chinese) [田大伦, 康文星, 文仕知 (2003). 杉木林生态系统学. 科学出版社, 北京. 22–59.]
- Tian X, Liu YQ, Wei XH, Zhang H, Wang WF, Zheng J, Hu JY (2014). Simulation of the effects of various mixing proportions on NPP and carbon storage in the mixedwood plantations of *Phoebe bournei* with *Cunninghamia lanceolata*. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 36(1), 122–130. (in Chinese with English abstract) [田晓, 刘苑秋, 魏晓华, 张松, 王伟峰, 郑吉, 胡靖宇 (2014). 模拟楠木杉木人工混交林不同混交比例对净生产力和碳储量的影响. 江西农业大学学报, 36(1), 122–130.]
- Wang WF, Duan YX, Zhang LX, Wang B, Li XJ (2016). Reviews on forest carbon sequestration counting methodology under global climate change. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 40(3), 170–176. (in Chinese with English abstract) [王伟峰, 段玉玺, 张立欣, 王博, 李晓晶 (2016). 适应全球气候变化的森林固碳计量方法评述. 南京林业大学学报(自然科学版), 40(3), 170–176.]
- Wang WF, Wei XH, Liao WM, Blanco JA, Liu YQ, Liu SR, Liu GH, Zhang L, Guo XM, Guo SM (2013). Evaluation of the effects of forest management strategies on carbon sequestration in evergreen broad-leaved (*Phoebe bournei*) plantation forests using FORECAST ecosystem model. *Forest Ecology and Management*, 300, 21–32.
- Wei XH, Blanco JA (2014). Significant increase in ecosystem C can be achieved with sustainable forest management in subtropical plantation forests. *PLOS ONE*, 9(2), e89688. doi: 10.1371/journal.pone.0089688.
- Wei XH, Kimmins JP, Zhou GY (2003). Disturbances and the sustainability of long-term site productivity in Lodgepole pine forests in the central interior of British Columbia—An ecosystem modeling approach. *Ecological Modelling*, 164, 239–256.
- Wei XH, Zheng J, Liu GH, Liu SR, Wang WF, Liu YQ, Blanco JA (2015). The concept and application of carbon sequestration potentials in plantation forests. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 3881–3885. (in Chinese with English abstract) [魏晓华, 郑吉, 刘国华, 刘世荣, 王伟峰, 刘苑秋, Blanco JA (2015). 人工林碳汇潜力新概念及应用. 生态学报, 35, 3881–3885.]
- Welham C, Rees KV, Seely B, Kimmins H (2007). Projected long-term productivity in Saskatchewan hybrid poplar plantations: Weed competition and fertilizer effects. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 356–370.
- Xiao X, Wang XT, Ouyang XZ (2015). The characteristic of soil organic carbon and relationship with litter quality in *Pinus massoniana* plantation. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 39(6), 105–111. (in Chinese with English abstract) [肖欣, 王雄涛, 欧阳勋志 (2015). 马尾松人工林土壤有机碳特征及其与凋落物质量的关系. 南京林业大学学报(自然科学版), 39(6), 105–111.]
- Xin ZH, Jiang H, Jie CY, Wei XH, Blanco JA, Zhou GM (2011). Simulated nitrogen dynamics for a *Cunninghamia lanceolata* plantation with selected rotation ages. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 28, 855–862. (in Chinese with English abstract) [辛赞红, 江洪, 接程月, 魏晓华, Blanco JA, 周国模 (2011). 模拟轮伐期长短对杉木人工林氮动态的影响. 浙江林学院学报, 28, 855–862.]
- Yao LH, Kang WX, Zhao ZH, He JN (2015). Carbon fixed characteristics of plant of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation at different growth stages in Huitong. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 1187–1197. (in Chinese with English abstract) [姚利辉, 康文星, 赵仲辉, 何介南 (2015). 会同杉木人工林不同生长阶段植物固碳特征. 生态学报, 35, 1187–1197.]
- Zhang XQ, Kirschbaum MUF, Hou ZH, Guo ZH (2004). Carbon stock changes in successive rotations of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) plantations. *Forest Ecology and Management*, 202, 131–147.
- Zhou J, Yuan HM, Li JY, Zhang W, Long HL, Li XQ, Chen Z (2015). Effect of *Cunninghamia lanceolata*-*Betula luminifera* mixed forests on soil microbial biomass and enzyme activity. *Journal of Northeast Forestry University*, 43(3), 83–86, 123. (in Chinese with English abstract) [周静, 袁华明, 李佳泳, 张炜, 龙汉利, 李晓清, 陈忠 (2015). 杉木-光皮桦混交林对微生物量碳氮与酶活性的影响. 东北林业大学学报, 43(3), 83–86, 123.]

特邀编委: 杜 盛 责任编辑: 李 敏



植物生态学报官网



微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布



微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览