

抚育间伐对桥山林区油松林乔木层碳储量的影响

韩福利¹,田相林^{2,3*},党坤良²,曹田健^{2,3}

(1. 陕西省森林资源管理局,陕西 西安 710082;2. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;
3. 生态仿真优化实验室,陕西 杨陵 712100)

摘要:本研究尝试利用生长过程表分析间伐对林分生长与收获的影响,探究抚育间伐后油松人工林碳储量的变化,为森林抚育经营和碳汇造林的理论和方法研究探索一条积极的思路。研究选取有5个间伐试验区组设计基础的陕北桥山林区油松人工林,结合生长过程表,通过生物学模型链接,初步构建了综合林分生长、生物量和碳储量预估模型的人工林抚育间伐方案评估体系。结果表明,抚育间伐能明显促进林分生长并显著降低林分的枯损率,抚育间伐的影响效果在间伐后5~12 a比前4 a更为显著。在间伐后5~12 a间,不同保留密度林分的初级生产力恢复到相似水平。抚育间伐后,林分碳储量的增长速度明显加快,但是由于间伐后林分密度的下降,对于单木和林分碳储量的影响并不相同。间伐林分的单木碳储量会明显高于未间伐林分,而间伐林分的乔木层碳储量在12 a后仍低于未间伐林分。分别以蓄积、经济材和碳固存为目标,得到的最佳经营方案都不同。通过各方案收益的比较分析,可以得到最优方案以满足林分经营的多目标需求。

关键词:抚育间伐;油松;林分;生长与收获;碳储量

中图分类号:S791.254 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2015)04-0184-08

Impact of Thinning on Carbon Storage for *Pinus tabulaeformis* Stands in Shaanxi Qiaoshan

HAN Fu-li¹, TIAN Xiang-lin^{2,3*}, DANG Kun-liang², CAO Tian-jian^{2,3}

(1. Forestry Resources Administration Bureau of Shaanxi, Xi'an, Shaanxi 710082, China; 2. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Simulation Optimization Lab., Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The effects of thinning on *Pinus tabulaeformis* plantations in Qiaoshan forests were studied by updating growth and yield tables with empirical data from thinning experiments. First, this study analyzed the development of stand diameter, height, basal area and volume after thinning with different initial densities. Second, biomass and carbon storage were converted based on empirical ecological models. In addition, thinning regimes were compared by using the updated growth and yield tables. The development of diameter, basal area and volume of thinned stands were less than the unthinned stands. However, the growth rate of thinned stands was higher than the unthinned stands. The results also indicated that thinning evidently led to lower mortality. The biomass and carbon storage of thinned stands were less than the unthinned stands at the initial stages, but the mean annual increment of biomass and carbon storage of thinned stands were higher. The results indicated that both timber production and forest carbon storage might be improved with well-planned thinning regimes based on growth and yield tables.

Key words: thinning; *Pinus tabulaeformis*; stand level; growth and yield; carbon storage

当前,全球气候发生着以变暖为主要特征的显著变化,大气中温室气体特别是二氧化碳浓度的增

收稿日期:2014-10-08 修回日期:2014-11-08

基金项目:国家林业局公益性专项项目(201204502)。

作者简介:韩福利,男,高级工程师,研究方向:森林资源管理。E-mail:forestry_tian@qq.com

*通信作者:田相林,男,博士,研究方向:森林经营决策系统及其应用。E-mail:tianxianglin@nwafu.edu.cn

加是导致全球气候变暖的主要因素之一,森林的碳汇作用因而也日益得到重视。在减缓气候变化的各种努力中,森林抚育经营在森林多功能服务的实现上起到至关重要的作用。

国外关于木材生产与碳固存的研究已经持续近20 a^[1],其中很重要的一部分是关于如何在保证木材生产的同时提高林分的碳固存。T. Kaipainen^[2]等利用碳通量模型计算发现通过延长森林经营的轮伐期,可以提高林业生产中的碳固存。D. Read^[3]等对比模型计算与间伐试验结果,发现通过调整采伐方式,将皆伐调整为择伐可以提高林地的碳固存。R. Mäkipää^[4]等和P. Olsson^[5]等的研究表明通过施肥等营林措施,可以改善立地条件从而影响林分生长,提高林分碳固存。Thornley和Cannell^[6]基于过程模型的研究表明,抚育间伐的次数、强度和间隔时间都会对森林生态系统的碳固存产生重要影响。Briceño-Elizondo^[7]等的研究发现在不延长轮伐期的条件下,适宜的间伐方案也可以提高林分碳固存量。这些研究多是将间伐措施与模型预测相结合,实现林分碳固存的动态预测,从而为森林经营决策提供依据。

国内对人工林生态系统碳储量动态及过程的研究,尤其抚育对森林碳汇功能的影响研究还比较缺乏^[8]。抚育间伐对林分生长发育动态影响的研究主要集中在不同间伐强度对胸径、树高、断面积和蓄积等林分因子的影响^[9],间伐对林木径阶^[10]和对林分生态系统养分动态的影响^[11],间伐对幼苗更新^[12]及幼龄林生长的影响^[13]等。林分生产力和生物量也被作为研究抚育间伐对林分生长影响的重要内容^[14-16]。而对于碳汇的研究多集中于计算森林生态系统碳储量上,许多学者采用不同方法对中国森林植被的碳储量进行了估算^[17-21]。在这些研究中,也包括基于间伐试验设计的碳储量测算^[8,16],但多是利用短期的对比试验得出的直观数据和结果,很难实现林分经营过程中碳固存的预测与核算。

在森林规划经营中,森林碳核算体系逐步成为重要的经济因素与政治约束^[22],这使得碳固存成为间伐经营设计需要考虑的重要因素之一。向玮^[23]等选用木材产量、树种和大小多样性、树木地上碳贮量作为经营目标,以相同权重构造综合目标进行折中,来对不同经营方案进行评价比较。戎建涛^[24]等以木材生产和碳增量净现值最大为规划目标,建立多目标规划模型从而求解得到规划期内林分最优经营方案。国内森林经营管理中碳固存的研究多集中于多目标经营规划中的应用,结合间伐后的林分生

长动态,并且能够有效预测间伐效应的相关研究相对缺乏。

本研究尝试通过研究抚育间伐对林分乔木层碳储量动态变化的影响机制,从林分生长收获和间伐效应动态预估的角度,探讨抚育与人工林生态系统碳储量定量关系。为合理确定基于碳汇效益的抚育关键技术提供依据。

1 数据来源

油松(*Pinus tabulaeformis*)是陕西桥山林区的主要成林树种,也是经营和管理的主要对象。本研究数据由两个部分构成,分别为陕北油松正常林分生长过程数据和桥山油松人工林不同保留密度区组设计的间伐试验数据。

1.1 正常林分生长过程数据

林业生产中的林分生长预测工作往往需要以正常林分(完满立木度)作为基准,正常林分生长过程表(即收获表)为反映正常林分主要调查因子的生长过程提供了依据,并可以有效地用于森林经营方案的设计^[25]。本研究基于陕北林区油松生长过程表Ⅱ、Ⅲ地位级和Ⅳ地位级^[26]设计试验区plot 1和plot 2(表1),用于估算完满立木度条件下油松林分生长过程中的碳储量动态变化过程,比较不同立地质量下油松林碳固存状况,并在此基础上进行间伐方案的设计和评估。

1.2 不同保留密度区组设计的间伐试验数据

保留密度是间伐经营中影响林分生长的重要可控因素。探究不同保留密度对于林分生长的影响需要进行控制处理试验和长期的调查观测。本研究间伐数据来源于杨澄^[27]等陕北桥山林区抚育间伐试验数据,该试验以不同保留密度等级设置4个区组,同时设有不间伐的对照区,每种区组都包括3块标准地的重复,在间伐后当年、间伐后4 a和12 a分别进行了观测。本研究中间伐试验区组及对照区编号为plot 3~plot 7(表1)。

表1 试验区组数据

Table 1 Biological data

试验 区组 编号	平均 胸径 /cm	平均 树高 /m	起始 年龄 /a	起始密度 (株· hm ⁻²)	间伐 强度 /%	伐后密度 (株· hm ⁻²)
plot 1	6.8	6.9	20	4 738		
plot 2	5.9	4.5	20	5 861		
plot 3	6.6	4.2	18	3 123	24.0	2 280
plot 4	6.7	4.3	18	3 585	23.6	2 750
plot 5	6.2	4.8	18	4 605	32.4	3 130
plot 6	5.3	4.3	18	5 120	26.6	3 815
plot 7	6.1	4.7	18	5 315	0	5 315

来源:Plots 1~2 陕北林区油松生长过程表^[26]; Plots 3~7, 杨澄等^[27]。

2 研究方法

2.1 林分生长趋势的计算

本次研究同时将正常林分与抚育间伐试验林分的生长过程进行了分析,从而探究并比较间伐与未间伐林分的生长过程。为了更好地比较分析林分生长状况,在主要林分调查因子数据基础上,补充了年平均枯损率(按株数计算)、生长率等内容的计算。

年平均枯损率(株数):

$$P = (N_t - N_{t+n}) / (n \times N_t) \quad (1)$$

式中, P 是按株数计算的林分年平均枯损率, N_t 是调查初期的每公顷株数, N_{t+n} 是调查末期的每公顷株数, n 是间隔的年份。

普雷斯勒生长率公式:

$$Z(t) = (y_t - y_{t-n}) / (y_t + y_{t-n}) \times 200/n \quad (2)$$

式中, $Z(t)$ 是树木在年龄 t 时的生长率, y_{t-n} 是调查初期的量, y_t 是调查末期的量, n 是间隔的年份。

2.2 林分乔木层生物量的计算

由于森林生物量测定的工作量非常大,而且耗时费力,因而抚育间伐的研究多侧重于对林分胸径、树高、蓄积量的影响上,不单独测定生物量。但是通过生物量模型估计的方法,利用已知的易测因子的数据,可以推算出树木各器官生物量,进而推算出林分的生物量。本研究采用马钦彦建立的陕北桥山林区油松生物量模型,分别包括单木及林分的干(带皮)、枝、叶、根方程共计 8 个模块,具体方程参数值参见文献[28]。

2.3 林分乔木层碳储量的计算

植物含碳率是估算植被碳储量必须的基本参数,在多目标经营模拟的研究中,一般采用 50% 作为森林生物量推算碳储量的转换系数^[23-24],但活体植物的碳含量常因树种和器官的不同而异,其变化幅度可为 47%~59%^[29-30],Bert 和 Danjon^[31]的研究发现,笼统地采用 50% 作为转换系数会造成法国西南部海岸松(*Pinus pinaster*)碳储量的估计偏低 6%。本研究采用赵萌捷^[32]利用重铬酸钾-硫酸氧化法测定的陕北油松人工林乔木干、皮、枝、叶、根的含碳率,计算陕北林区油松乔木层各器官碳储量。

2.4 基于收获表的间伐方案设计

间伐方案的设计基于陕北油松收获表,对于蓄积部分的数据,原收获表是查林分每公顷断面积与蓄积量标准表得到的,在设计抚育间伐方案时,为了便于分析计算,本研究采用平均实验形数的方法进行蓄积的计算。计算公式:

$$V = (H+3) \times G \times f_o \quad (3)$$

式中, V 是林分蓄积量, H 是林分平均树高, G 是每

公顷断面积, f_o 是平均实验形数。根据陕西省主要树种平均实验形数表^[26],油松实验形数为 0.42。

在设计抚育间伐方案时,我们并没有将间伐强度设为固定值,而是每次通过间伐将林分密度降低到生长过程表 5 a 后的密度,利用间伐试验林分的枯损率来估算 5 a 间的林分枯损,之后由于密度再次与收获表接近,仍采用原收获表的枯损率,直至下一次间伐。

$$P_{\text{thin}} / P_{\text{unthin}} = P_{\text{thin}\#} / P_{\text{unthin}\#} \quad (4)$$

式中, P_{thin} 是试验林分间伐后枯损率, P_{unthin} 是未间伐林分枯损率, $P_{\text{thin}\#}$ 是设计间伐方案预测的林分枯损率, $P_{\text{unthin}\#}$ 是原收获表的枯损率。

戎建涛^[24]等将蓄积乘以固定出材率(阔叶材出材率取 0.65,针叶材出材率取 0.7)得到木材产出。但是实际上随林分年龄的增长平均胸径随之增长,出材率也会相应改变。因此,本研究在计算经济材出材率时,按照陕北林区油松平均材种出材量表^[26]来进行计算。

试验数据中的 plot 1 来源于第Ⅱ、Ⅲ 地位级, plot 2 中的数据来源于第Ⅳ 地位级。林分高是立地质量的直接评定方法之一^[33],由表 1 的林分平均高数据可以看出,间伐所采用的数据(陕北桥山林区)与陕北第Ⅳ 地位级的生长过程表(plot 2)立地条件非常接近,而与Ⅱ、Ⅲ 地位级(plot 1)相差较远,因此本研究在进行抚育间伐方案时,采用第Ⅳ 地位级的生长过程表作为设计基础。利用抚育间伐试验林分的数据,我们可以估算林分间伐后的枯损率,并设计了 9 个间伐方案,进行比较评估。

3 结果与分析

3.1 正常林分生长过程

基于全林模型(收获表)模拟林分主要因子的生长过程,利用相对生长模型可以计算出树木不同器官的生物量及总生物量,乘以各组分含碳率,就可以得到乔木层碳储量的生长过程(图 1)。

林分的生长过程会伴随着碳储量的逐年增加,从图 1 可以看出,当林分达到成、过熟林时,林分的碳储量会远高于中龄林阶段。由于 plot 1 是取自第Ⅱ、Ⅲ 地位级,而 plot 2 是取自第Ⅳ 地位级,在立地质量更好的条件下,林分生长会更迅速,从而具有更高的碳储量。在各组分之中,林分的树干部分(含皮)碳储量所占的比重最大,并且随着年龄增长会继续增加,从 20 a 时的 41.3% 和 45.0%,到 80 a 时的 56.5% 和 58.2%。

3.2 抚育间伐对林分生长的影响

在计算分析正常林分生长过程的基础上,本研

究对抚育间伐试验林分进行了乔木层生长因子、净初级生产力和碳储量的计算分析。

从表1可知,林分保留密度依次为:plot 3<plot 4<plot 5<plot 6<plot 7,未间伐的plot 7具有最高的每公顷株数。由图2(a)可以看出,在抚育间伐当年,林分平均胸径有所上升,这是由于间伐操作中,主要采伐IV、V级木(克拉夫特生长分级),双生木、断梢木,为照顾均匀也伐去少量III级木和个别

I、II级木。下层抚育对林分平均胸径的增长有着显著的作用,随着间伐后保留密度的升高,平均胸径相应地降低。从图2(b)中则可以看出,对于林分蓄积,尽管间伐林分有较快的生长,但在观测的12 a间,间伐林分始终会低于保留密度最高的未间伐林分,说明在油松人工林中龄林阶段,间伐带来林分密度的降低会导致林分蓄积的下降。

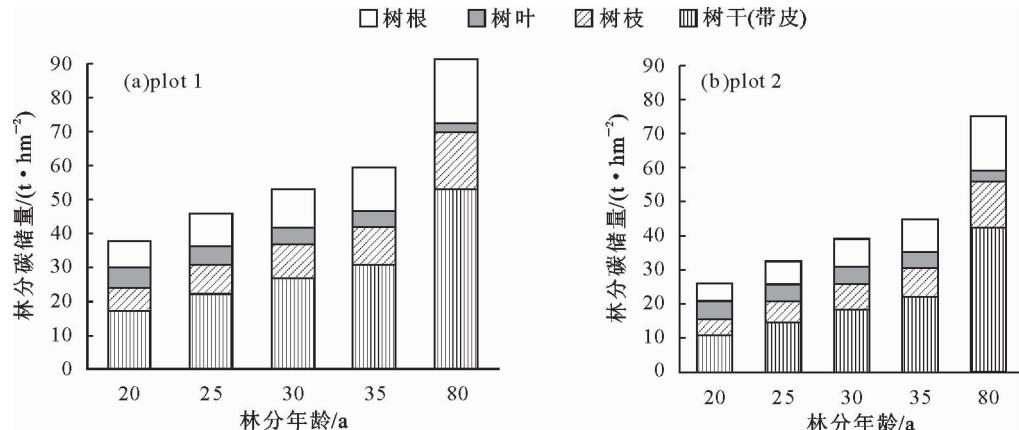


图1 正常林分乔木层碳储量的生长过程

Fig. 1 Carbon storage of arborescent stratum in normal stands

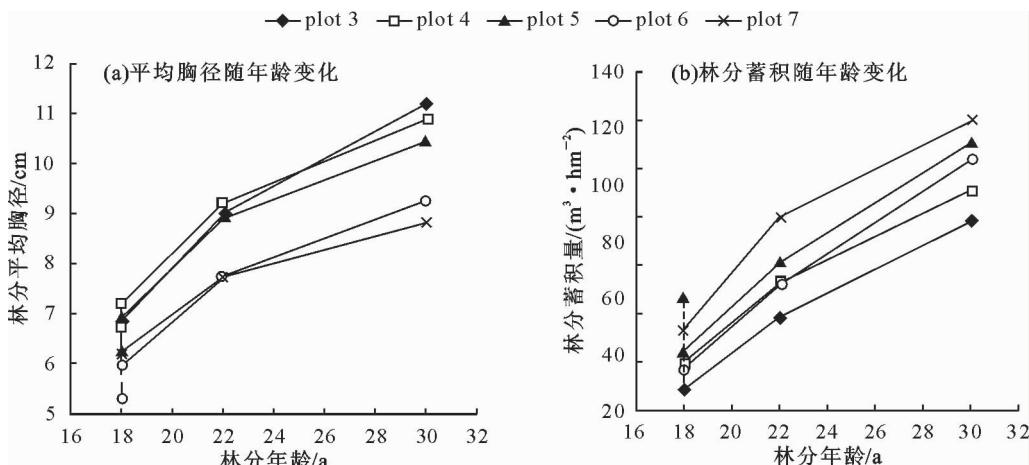


图2 间伐试验林分生长过程

Fig. 2 The process of stand growth for thinning experimental plots

图3描述林分每公顷胸高断面积随林分平均树高的变化趋势。该图避免了以年龄为横轴时在间伐当年的数据相互重叠,更清晰地表现林分间伐前后林分状态的变化。从图3中可以看出,由于采用了下层抚育的方法,在间伐当年,林分的平均树高有了明显提高,plot 3、plot 4 和 plot 6 在间伐前平均树高低于未间伐的plot 7,但在间伐后高于未间伐林分。而且,在整个试验周期内(即使是在间伐前),plot 7(未间伐)的每公顷胸高断面积都始终高于其他未间伐林分。由于各试验区组本身初始条件的不一致,本研究分别从枯损率和相对生长率的角度,对间伐影响进行了分析。从图4中可以看出,间伐林

分的枯损率明显低于未间伐林分,保留密度最低的plot 3甚至未发生枯损,说明通过间伐降低林分密度能减小林分竞争压力,降低枯损率。未间伐并且密度最大的林分plot 7,在12 a间的枯损率一直都较高,而且前4 a的枯损最高,说明在幼龄阶段密度大的林分易发生枯损,间伐应在幼龄林阶段就开始实施。而plot 4 和 plot 5 在间伐后前4 a枯损率很低,在后8 a枯损率略有升高,说明间伐后随着林分加速生长,竞争压力也会逐渐增大。

抚育间伐对于林分生长的促进作用,可以用生长率来描述。抚育间伐后保留密度对林分生长的影响也会随时间推移有所变化。试验区组数据是抚育

间伐后第 4 年和第 12 年的观测值。由图 5 可以看出, 在间伐后的前 4 a 间, 最高保留密度的 plot 7 的每公顷胸高断面积相对于 plot 3 生长率为 79.12%, 而对于后 8 a(第 5~12 年), 相对生长率下降到了 50.05%。说明降低保留密度对于每公顷胸高断面积生长的促进作用在间伐 5 a 之后会比刚刚间伐完成后的前 4 a 更加显著。

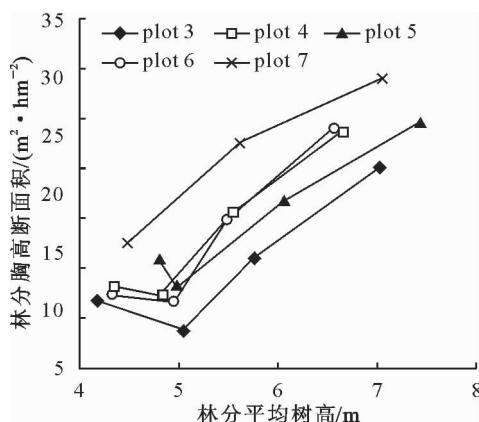


图 3 胸高断面积随树高变化趋势

Fig. 3 Basal area development with stand height

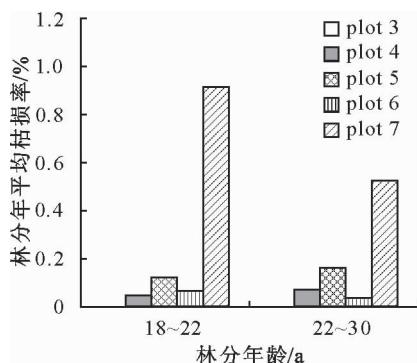


图 4 间伐后不同时期林分枯损率

Fig. 4 The mortality in different periods after thinning

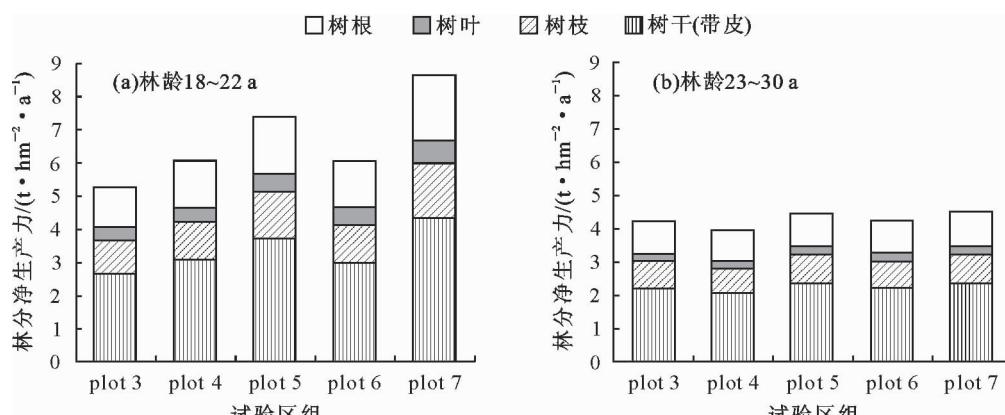


图 6 不同保留密度林分净生产力的比较

Fig. 6 Comparison of net productivity on stands of different conserved densities

本研究从间伐后不同保留密度的角度进行了分析。从图 8 中可以看出, 间伐当年(林龄 18 a)保留

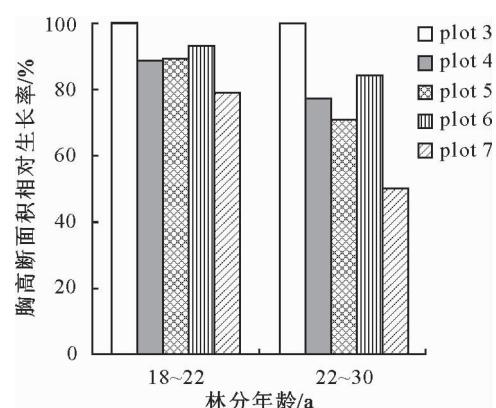
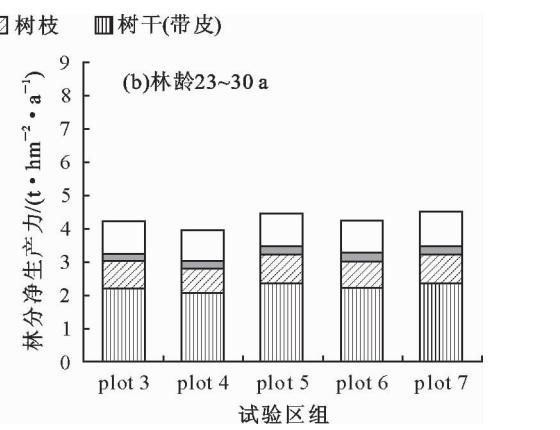


图 5 以 plot 3 为基准各试验区组的胸高断面积相对生长率

Fig. 5 Relative growth rate of basal area based on plot 3

抚育间伐对于林分胸径、林分密度、蓄积等各因子产生影响, 进而也会影响林分生物量的生长。从图 6(a)可以看出, 在刚完成间伐的前 4 a, 即林龄 18~22 a 间, 随保留密度的增加, 林分的净生产力也呈现升高的趋势, 尤其是未间伐的 plot 7 拥有最高的净生产力。但该规律在间伐后的 5~12 a 间却并不明显, 如图 6(b)所示, 在林龄 22~30 a 时, 林分乔木层生产力下降, 不同保留密度林分间的差异也不再明显。

结合含碳率的相关研究, 最终可以通过计算得到抚育间伐对于油松林乔木层碳储量的影响效果。从图 7 可以看出, 抚育间伐后, 保留密度较低的 plot 3、plot 4、plot 5 的单木碳储量明显高于保留密度较高的 plot 6 和未间伐密度最高的 plot 7。其中 plot 3 保留密度最低, 在林分年龄 22 a 时(间伐当年), 单木碳储量还略低于 plot 4 和 plot 5, 但在林分 30 a 时(伐后第 12 a), 单木碳储量明显是最高的三组。



密度较低的林分会明显低于保留密度较高的林分, 在随后的 12 a 间, 尽管较低保留密度的林分碳储量

有着较快的增长,但依然会低于保留密度较高的林分。说明抚育间伐对于林分碳储量的降低,并不能在很短的时间里被间伐后的生长促进效应所弥补。

3.3 基于收获表的间伐方案的设计与评估

本研究利用收获表进行林分生长预测,通过对生物量模型、出材率方程和含碳率等研究的链接,构建了综合林分蓄积生长、经济材产量和碳储量的陕北油松人工林抚育间伐方案评估体系。

从表2中可以看出,在不考虑间伐成本和木材价格的条件下,若采用相同轮伐期,林分年蓄积收获量、年经济材收获量和年平均碳固存量都随着间伐

次数增加而增大。而对于不同的轮伐期而言,方案2、方案4、方案6、方案8都进行了3次间伐,50 a轮伐期方案的年蓄积收获量最高,且随轮伐期的延长逐渐减小,但经济材出材量从50 a的轮伐期到70 a主伐逐渐增大,到80 a轮伐期方案时才开始下降,说明在经营方案制定时,应将轮伐期控制在80 a以内。相比蓄积收获作为目标,以经济材收获作为目标会导致最优轮伐期的时间延长。通过对各个方案收益的等权重平均值进行比较,得到方案5为最优,同时满足林分蓄积生产、经济材出材量和碳固存的多目标需求。

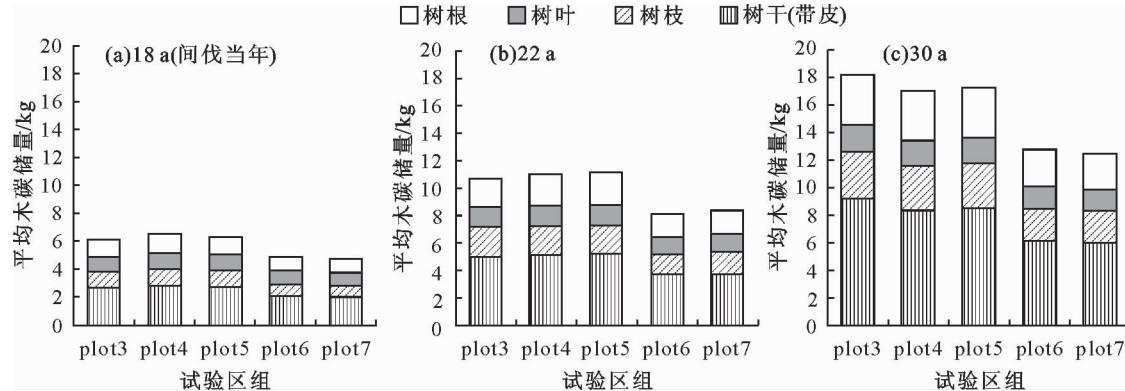


图7 抚育间伐对油松单木碳储量的影响
Fig. 7 Carbon storage of single tree organs after thinning

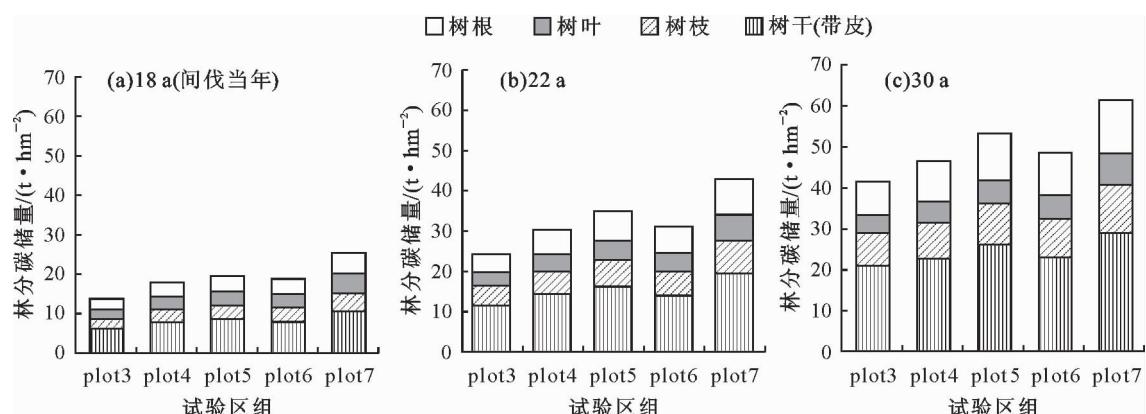


图8 间伐对油松林碳储量的影响
Fig. 8 Effects of thinning on stand carbon storage

4 结论与讨论

抚育间伐对各林分因子的状态有明显改变,本研究表明低保留密度林分的平均胸径和蓄积生长率会高于高保留密度,未间伐林分生长率最低。同时随着密度降低,林分枯损率也会显著的降低。然而,通过对间伐后前4 a和后8 a生长率的对比,结果表明保留密度对于林分生长的影响,以每公顷胸高断面积为例,在伐后前4 a并不明显,而在伐后的第5~第12年间有更为显著的影响。说明抚育间伐对

林分生长的影响并不会在采伐后立即完全表现出来,而是随着林分生长效果逐渐明显。

由于间伐在导致林木数量上降低的同时也改善了林内的空间结构,相应生产力也会发生改变。J. Campbell^[34]等的间伐试验表明,采用高强度间伐(约50%)会持续降低林分的净初级生产力,美国黄松(*Pinus ponderosa*)人工林在间伐16 a后,林分初级生产力仍然低于伐前水平。然而桥山林区中等间伐强度(24%~32%)油松林分乔木层净初级生产力的计算结果表明,在刚完成间伐的前4 a,林分生产

表 2 抚育间伐方案

Table 2 Thinning regimes

方案 编号	轮伐期 /a	间伐 次数	间伐年龄 /a	年平均蓄积 收获量 $/(m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	标准化 年平均 蓄积收获量	年平均经济 材收获量 $/(m^3 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	标准化 年平均经济 材收获量	年平均碳 固存量 $/(t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1})$	标准化 年平均 碳固存量	标准化 总目 标值
1	50	2	20-35	3.23	0.89	1.85	0.87	1.47	0.90	2.66
2	50	3	20-30-40	3.58	0.99	1.88	0.89	1.63	1	2.88
3	60	2	20-40	3.07	0.85	1.92	0.91	1.34	0.82	2.58
4	60	3	20-30-45	3.31	0.91	1.93	0.91	1.46	0.90	2.72
5	60	4	20-30-40-50	3.63	1	2.12	1	1.60	0.98	2.98
6	70	3	20-35-50	3.12	0.86	2.03	0.96	1.33	0.82	2.64
7	70	4	20-30-45-55	3.37	0.93	2.08	0.98	1.45	0.89	2.80
8	80	3	20-40-60	2.94	0.81	1.95	0.92	1.22	0.75	2.48
9	80	4	20-35-50-65	3.14	0.87	2.09	0.99	1.31	0.80	2.66

力随保留密度的增加而升高,但在间伐后的第5~第12年,不同保留密度林分的生产力则没有明显的差异。说明间伐导致林分生产力的降低仅仅是一种短期的效应,林分由于间伐空隙而增加的生长量会逐渐弥补间伐后生产力的降低。

研究结果表明抚育间伐能明显地促进林分碳储量的增长。对于单木的碳储量而言,抚育间伐会有非常明显的作用效果,低保留密度的林分单木碳储量会远大于高保留密度的林分。D. A. Spring^[35]等的模拟研究发现,瑞格楠(*Eucalyptus Regnans*)林间伐后约60 a,其碳储量才能恢复到伐前水平。而与此相反,游伟斌^[8]等通过30年生油松人工林不同强度的抚育间伐试验,发现强度间伐和中度间伐均能提高油松人工林的碳储量。桥山林区的间伐试验表明,间伐后林分碳储量的增长虽然会明显加速,但并不会使林分乔木层总的碳储量在很短的几年内迅速赶上或者超过未间伐的高密度林分。这可能与试验林分的设计选取、采伐强度和采伐年龄等因素有关。

通过基于收获表的间伐经营方案的设计和评估,发现分别蓄积、经济材和碳固存为目标,得到的最佳经营方案都不同。向玮^[23]等在进行多目标经营模拟时将木材(蓄积)生产、树种和大小多样性及地上碳贮量的变化作为经营方案评价的依据。本研究未考虑多样性因素,但是在木材生产中同时考虑到了蓄积生产和经济材生产,而且在计算经济材时分别不同径阶和不同的出材率,结果表明相对于蓄积生产,以经济材生产为目标会使轮伐期延长,这是由于林分只有到达足够径阶时才会有较高经济材出材量,同时早期的采伐由于林木径阶很小,经济材出材量也会非常少。研究所采用的蓄积计算方程相比生物量方程,随林木尺寸增大的比例会更高,同时正常林分是完满立木度,在林分年龄较小时就已经有

相对较高的生物量,这些因素都会导致轮伐期的提前。由于研究中未考虑采伐成本与木材价格等因素,生产实际中则需加以调整。

通过对间伐试验、林分生长预测模型、生物量模型和含碳率等已有研究成果的有效链接,预测间伐对林分生长与碳固存变化的影响,实现了以碳储量和木材生产为经营目标的森林多功能经营规划与动态评估。该方法不仅适用于陕北桥山,而且易于应用到其他林区,进行间伐和碳储量等的动态评估。

参考文献:

- [1] RICHARDS K R, STOCKES C. A review of forest carbon sequestration cost studies:a dozen years of research[J]. Climatic Change, 2004, 63(1/2):1-48.
- [2] KAIPAINEN T, LISKI J, PUSSINEN A, et al. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests [J]. Environmental Science & Policy, 2004, 7(3):205-219.
- [3] READ D, BEERLING D, CANNELL M, et al. The role of land carbon sinks in mitigating global climate change[J]. The Royal Society, 2004, 10(1):1-27.
- [4] MÄKIPÄÄ R, KARJALAINEN T, PUSSINEN A, et al. Effects of nitrogen fertilization on carbon accumulation in boreal forests: model computations compared with the results of long-term fertilization experiments[J]. Chemosphere, 1998, 36(4):1155-1160.
- [5] OLSSON P, LINDE S, GIESLAR R, et al. Fertilization of boreal forest reduces both autotrophic and heterotrophic soil respiration[J]. Global Change Biology, 2005, 11(10):1745-1753.
- [6] 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.
- [7] BRICEÑO-ELIZONDO E, GARCIA-GONZALO J, PELTO-LA H, et al. Carbon stocks and timber yield in two boreal forest ecosystems under current and changing climatic conditions subjected to varying management regimes[J]. Environmental Science & Policy, 2006, 9(3):237-252.

- [8] 游伟斌, 梁芳, 贾忠奎, 等. 抚育间伐对北京山区油松林乔木层碳储量的影响[J]. 北方园艺, 2012, 23(2): 203-206.
- [9] 董希斌. 采伐强度对林分蓄积生长量的影响[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(2): 35-37.
- DONG X B. The impacts of cutting intensity on stand volume growth[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2001, 29(2): 35-37. (in Chinese)
- [10] 徐六一, 虞沐奎. 湿地松人工林间伐效应的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2001, 28(4): 417-421.
- [11] 方海波, 田大伦, 康文星. 间伐后杉木人工林生态系统生物产量的动态变化[J]. 中南林学院学报, 1999, 19(1): 16-19.
- [12] 邓磊, 张文辉, 何景峰, 等. 不同采伐强度对辽东栎林幼苗更新的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 160-166.
- DENG L, ZHANG W H, HE J F, et al. Effects of different cutting intensities on seedling regeneration of *Quercus liaotungensis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(2): 160-166. (in Chinese)
- [13] 黄承标, 马承彪, 曹继钊, 等. 不同立地及间伐强度对马尾松人工幼林生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 141-145.
- [14] 熊有强, 盛炜彤, 曾满生. 不同间伐强度杉木林下植被发育及生物量研究[J]. 林业科学研究, 1995, 8(4): 408-412.
- [15] 李春明, 杜纪山, 张会儒. 间伐对长白落叶松林分生物量的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 6(6): 69-73.
- [16] 明安刚, 张治军, 谌红辉, 等. 抚育间伐对马尾松人工林生物量与碳贮量的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(10): 1-6.
- MING A G, ZHANG Z J, CHEN H H, et al. Effects of thinning on the biomass and carbon storage in *Pinus massoniana* plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(10): 1-6. (in Chinese)
- [17] FANG J, WANG G G, et al. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship[J]. Ecological Applications, 1998, 8(4): 1084-1091.
- [18] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [19] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- WANG X K, FENG Z W, OUYANG Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 13-16. (in Chinese)
- [20] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 50-54.
- ZHAO M, ZHOU G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004(1): 50-54. (in Chinese)
- [21] 徐新良, 曹明奎. 森林生物量遥感估算与应用分析[J]. 地球信息科学, 2006, 8(4): 122-128.
- XU X L, CAO M K. An analysis of the applications of remote sensing method to the forest biomass estimation[J]. Geo-Information Science, 2006, 8(4): 122-128. (in Chinese)
- [22] BETTINGER P, BOSTON K, SIRY J P, et al. Forest management and planning[M]. Academic Press, 2010: 290-294.
- [23] 向玮, 雷相东, 洪玲霞, 等. 落叶松云冷杉林矩阵生长模型及多目标经营模拟[J]. 林业科学, 2011, 47(6): 77-87.
- [24] 戎建涛, 雷相东, 张会儒, 等. 兼顾碳贮量和木材生产目标的森林经营规划研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 155-162.
- RONG J T, LEI X D, ZHANG H R, et al. Forest management planning incorporating value of timber and carbon[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(2): 155-162. (in Chinese)
- [25] BUONGIORNO J, GILLESS J K. Decision methods for forest resource management[M]. Academic Press, 2003.
- [26] 陕西林业工作手册[M]. 西安:陕西省林业厅, 1987.
- [27] 杨澄, 刘建军, 何海燕. 油松人工林抚育间伐效果初步研究[J]. 西北林学院学报, 1991, 6(2): 44-50.
- [28] 马钦彦. 中国油松生物量的研究[J]. 北京林业大学学报, 1989, 11(4): 1-10.
- [29] LAIHO R, LAINE J. Tree stand biomass and carbon content in an age sequence of drained pine mires in southern Finland [J]. Forest Ecology and Management, 1997, 93(1): 161-169.
- [30] LAMMON S H, SAVIDGE R A. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(4): 381-388.
- [31] BERT D, DANJON F. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.) [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 222: 279-295.
- [32] 赵萌捷. 陕西省人工油松林群落碳密度动态特征及影响因素研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
- [33] 孟宪宇. 测树学[M]. 3版. 北京:中国林业出版社, 2006: 101-102.
- [34] CAMPBELL J, ALBERTI G, MARTIN J, et al. Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257: 453-463.
- [35] SPRING D A, KENNEDY J O S, MAC NALLY R. Optimal management of a forested catchment providing timber and carbon sequestration benefits: Climate change effects [J]. Global Environmental Change, 2005, 15(3): 281-292.