

补植木荷对湿地松林林木生长及林分碳密度的影响

周巧晴¹,周美才²,潘 萍¹,宁金魁¹,邬可钰¹,欧阳勋志^{1*}

(1. 江西农业大学 林学院,鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室,江西 南昌 330045;

2. 安福县明月山林场,江西 吉安 343200)

摘 要:探究补植木荷对湿地松林林木生长及林分碳密度的影响可为湿地松纯林提高林分稳定性及功能的改造提供参考依据。以江西省吉水县 23 年生受灾湿地松林为研究对象,于 2013 年选择立地条件相似且地域相邻地块分别设置补植(补植 1 年生木荷)和对照(纯林)配对固定样地,2013 年和 2021 年对 5 组配对固定样地进行样地调查与样品测定。采用配对样本 T 检验,分析湿地松林补植木荷后对林木生长及不同组分碳密度的影响。结果表明,1)补植木荷 8 a 后,湿地松的平均胸径显著高于对照样地($P<0.05$),其平均胸径及平均单株材积的增长量分别比对照样地提高了 27.27%和 63.92%。2)乔木层、凋落物层、土壤层的碳密度及林分总碳密度分别比对照样地提高了 62.01%、108.66%、40.09%和 41.31%,而林下植被层碳密度则减少了 12.75%,其中凋落物层碳密度和林分总碳密度提高显著($P<0.05$)。3)补植样地的乔木层、植被(乔木层+林下植被层+凋落物层)碳密度及林分总碳密度 8 a 间的增长量均显著高于对照样地($P<0.05$)。因此,补植木荷能够有效促进湿地松林林木生长及显著提高林分碳密度。

关键词:湿地松林;补植;木荷;林木生长;碳密度

中图分类号:S791.246

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0067-07

Effects of Replanting *Schima superba* on the Tree Growth and Carbon Density of *Pinus elliottii* Plantations

ZHOU Qiao-qing¹, ZHOU Mei-cai², PAN Ping¹, NING Jin-kui¹, WU Ke-yü¹, OUYANG Xun-zhi^{1*}

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for the Protection and Restoration of Forest Ecosystem in Poyang Lake Basin, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;

2. Anfu County Mingyue Mountain Forestry Centre, Jian 343200, Jiangxi, China)

Abstract: Exploring the effect of replanting *Schima superba* on tree growth and stand carbon density of *Pinus elliottii* plantations can provide reference for improving the stability and function of *P. elliottii* pure plantations. Taking the 23-year-old *P. elliottii* plantations damaged by freezing disaster in Jishui County, Jiangxi Province as the research object, in 2013, the plots with similar site conditions and geographical adjacent plots were selected to set up the paired fixed plots of replanting (replanting one-year-old seedlings of *S. superba*) and control (pure plantation). In 2013 and 2021, five pairs of fixed plots were investigated and measured. The effects of replanting *S. superba* on the tree growth and carbon density of different components were analyzed by paired sample T test. The results showed that 1) After 8 years of replanting *S. superba*, the average DBH of *P. elliottii* was significantly higher than that of the control plots ($P<0.05$), and the average DBH and average individual volume increased by 27.27% and 63.92%, respectively. 2) Compared with the control plots, the carbon density of the tree layer, litter layer, soil layer and total carbon

收稿日期:2022-10-22 修回日期:2022-11-21

基金项目:国家自然科学基金项目(32260392,31760207);亚洲开发银行 CCF(气候变化基金)江西赠款项目(0229-PRC)。

第一作者:周巧晴。研究方向:森林资源管理与监测。E-mail:319284919@qq.com

* 通信作者:欧阳勋志,博士生导师,教授。研究方向:森林资源管理与监测和森林生态。E-mail:oyxz@jxau.edu.cn

density of the stand increased by 62.01%, 108.66%, 40.09% and 41.31%, respectively, while that of understory vegetation layer decreased by 12.75%, and the carbon density of litter layer and total carbon density of the stand increased significantly ($P < 0.05$). 3) The increments of carbon density of the tree layer, vegetation (tree layer + understory vegetation layer + litter layer) and total carbon density in 8 years were significantly higher than those in control plots ($P < 0.05$). Therefore, replanting *S. superba* can effectively promote the growth of *P. elliotii* plantations and significantly increase carbon density.

Key words: *Pinus elliotii* plantation; replantation; *Schima superba*; tree growth; carbon density

作为全球碳循环的重要组成部分,森林生态系统具有保存现有碳库、增加碳汇^[1-2],以及缓解气候变化的能力^[3]。森林碳储量占全部陆地碳储量的46%^[4-5],其固碳功能对陆地生态系统固碳和全球及区域气候变化具有重要影响^[6-8]。尽管造林和再造林是固碳增汇的重要途径之一^[9-10],但依靠扩大造林面积增汇空间有限。我国第九次全国森林资源清查表明,全国人工林面积为7 954.28万 hm^2 ,人工林面积居世界第一,因此,提高人工林固碳能力是增加我国森林碳汇的重要途径。人工林采取什么经营模式以促进固碳能力提高方面的研究日益受到学者们的关注^[11-12],常见的经营措施有间伐抚育、林窗疏伐、带状采伐以及补植乡土阔叶树种等,而现在对针叶纯林的改造措施多为林下补植,营造针阔混交林。如赖国桢等^[13]研究马尾松(*Pinus massoniana*)木荷(*Schima superba*)混交得出飞播马尾松林中补植木荷有利于提高植被的固碳能力;卢立华等^[14]研究结果表明马尾松红椎(*Castanopsis hystrix*)混交林生态系统碳储量显著高于纯林;明安刚等^[15]研究结果表明马尾松杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林通过近自然化改造(疏伐、补植),能够显著提升其生物量和生产力并且可以为增强植被固碳能力创造有利条件。然而,针对研究对象或补植树种等的不同,其固碳功能的变化可能存在一定的差异。

湿地松(*Pinus elliotii*),为速生常绿乔木树种,原产于美国东南部,于20世纪30年代引入我国,已成为南方丘陵区主要的造林树种之一。关于湿地松的研究主要集中在采脂^[16]、种子孕育及性系遗传^[17]、生长方程^[18]、生物量^[19]等方面,对其固碳能力研究较少。在2008年我国南方严重的冰冻灾害中湿地松林受灾严重,灾后恢复主要是采取补植等措施。本研究以具有代表性湿地松种植区的江西省吉水县为研究区,探讨湿地松纯林补植木荷后对林木生长及碳密度的影响,为湿地松纯林改造及其碳汇经营策略的制订提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吉水县(114°38′—115°36′E, 26°52′—27°33′N)

地处江西省中部。地貌以丘陵为主,土壤以红壤为主,占62.5%。气候为中亚热带湿润季风气候,年平均气温18.8℃,年平均降水量为1 527 mm。研究区较早引进并人工栽植湿地松,已成为其主要造林树种之一,据2019年森林资源二类调查结果,其面积达3.54万 hm^2 ,占全县乔木林面积的24.5%。现有湿地松人工林多为纯林,主要分布在丘陵、岗地,林下灌木以桉木(*Eurya japonica*)、欆木(*Loropetalum chinense*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、石楠(*Photinia serratifolia*)等为主;草本植物以茅草(*Imperata cylindrica*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主。2008年的严重冰雪灾害对湿地松林危害很大,大量林木被压倒或折断,灾后管理主要是清理受灾木,对部分受灾林采用见缝插针式补植木荷。

1.2 样地设置及调查

于2013年12月,在湿地松生长状况及林龄相同的地段上设置补植(受灾林木清理后见缝插针式补植1年生木荷,平均地径为0.5 cm,苗高45 cm,穴规格为30 cm×30 cm×40 cm)与对照(受灾林木进行了清理但没有补植)配对固定样地,共设置5组配对样地,每组配对样地在地域上相邻,其土壤均为红壤,且坡向、坡位、坡度等立地条件基本一致,海拔106~155 m,样地面积均为400 m^2 (20 m×20 m)。对胸径 ≥ 2 cm的湿地松及其他树种进行每木检尺,并调查其树高及立地因子等,样地基本概况见表1。在每个样地的上、中、下分别布设1个2 m×2 m的灌木样方,灌木样方内中再各设置1个1 m×1 m的草本样方及1个0.5 m×0.5 m的凋落物样方。采用“样方全收获法”分别调查灌木、草本和凋落物层的生物量,其中,灌木生物量分叶、枝、根;草本生物量分地上与地下部分;凋落物生物量分为分解与半分解。分别收集样品并称其鲜质量,并各称取大约200 g的样品带回实验室进行烘干并计算其含水量。在样地中选择具有代表性地段挖土壤剖面,记录下各样地的土壤类型、土层厚度、腐殖质层厚度和石砾含量;采用环刀法按0~10、10~20、20~30 cm土层分别取样用于测定土壤的物理性质,同时每层取约1 kg的土壤带回实验室自然风干用于测定土

壤有机碳含量。所有调查内容于 2021 年 7 月进行复查。

1.3 生物量测定

乔木层生物量的测定采用相对生长方程估算法,采用的相对生长方程见表 2;林下植被及凋落物层通过样品含水量,进而可以算出整个样方的生物量,最后推算出每块标准地的总生物量^[20-21]。

1.4 碳密度计算

将烘干的灌木、草本、凋落物样品及风干的土壤样品研磨粉碎,过 0.25 mm 筛,所有样品均采用重铬酸钾氧化-外加热法测定其碳含量。乔木层碳密度为乔木层的生物量乘以其碳含量,其中湿地松与木荷的碳含量采用王兵等^[22]的研究数据,分别为

0.521 和 0.496。林下植被层、凋落物层碳密度为各组分生物量乘以相对应的碳含量。土壤碳密度计算公式如下^[23]

$$D_{\text{soc}} = \sum_{i=1}^K C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i)$$

式中: D_{soc} 为土壤碳密度($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); C_i 为土壤有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); D_i 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); E_i 为土层厚度(cm); G_i 为直径 $>2 \text{ mm}$ 的石砾所占体积百分比(%); k 为土层数。

1.5 数据处理

运用 SPSS 25.0 软件进行配对样本 T 检验,差异显著性以 $P < 0.05$ 为基准。统计数据采用 Microsoft Excel 2010。

表 1 样地基本概况(2013 年)

Table 1 Basic situation of sample plots in initial reform of *Pinus elliottii* forest in 2013

样地类型	编号	立地条件			湿地松				木荷密度/ (株·hm ⁻²)
		坡向	坡位	坡度/(°)	林龄/a	林木密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m	
对照样地	1	北	上	9	23	650	13.1	8.5	—
	2	北	中	10	23	775	14.3	9.5	—
	3	西北	下	7	23	1 050	13.7	9.0	—
	4	西南	下	8	23	750	12.0	10.0	—
	5	南	中	21	23	1 125	12.6	9.0	—
补植样地	1	北	上	10	23	700	14.4	9.0	1 700
	2	北	中	10	23	350	13.9	10.0	1 475
	3	西北	下	8	23	600	15.2	8.5	1 400
	4	西南	下	10	23	500	15.0	9.5	1 875
	5	南	中	22	23	1 025	12.7	9.5	1 500

注:对照样地与补植样地的编号数值相同为一对配对样地,“—”为无数据。

表 2 主要乔木树种生物量相对生长方程

Table 2 The relative growth equations of biomass of main arbor species

树种	相对生长方程	文献
湿地松	$W_{\text{地上}} = 0.083\ 890 D^{2.440\ 91}$	[20]
	$W_{\text{地下}} = 0.043\ 570 D^{2.228\ 77}$	
木荷	$W_{\text{地上}} = 0.176\ 85 D^{2.263\ 14}$	[21]
	$W_{\text{地下}} = 0.064\ 079 D^{2.19784}$	

注: $W_{\text{地上}}$ 、 $W_{\text{地下}}$ 分别表示乔木地上和地下的生物量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), D 表示胸径(cm)。

2 结果与分析

2.1 对湿地松生长的影响

由表 3 可知,2013 年补植样地与对照样地的湿地松平均胸径、平均单株材积均不存在显著差异($P > 0.05$),而到 2021 年补植样地的平均胸径显著高于对照样地($P < 0.05$),但平均单株材积差异不显著。从增长量来看,补植样地与对照样地的平均胸径、平均单株材积的增长量均不存在显著差异,但补植样地的平均胸径、平均单株材积较 2013 年分别

提高了 4.2 cm 和 0.079 5 m^3 ,而对照样地较 2013 年分别提高了 3.3 cm 和 0.048 5 m^3 ,补植样地的平均胸径、平均单株材积的增长量分别比对照样地提高了 27.27%、63.92%。可见,补植木荷对湿地松生长具有促进作用。

2.2 对湿地松林碳密度影响

2.2.1 植被碳含量及碳密度 林下植被及凋落物碳含量结果见表 4。由表 4 可知,植物根的碳含量低于地上部分,灌木的碳含量表现为叶 $>$ 枝 $>$ 根,草本的碳含量地上 $>$ 地下。对照样地与补植样地各组分碳含量并无显著差异性($P > 0.05$)。

植被碳密度计算结果见表 5。由表 5 可知,2013 年补植样地与对照样地的乔木层、林下植被层、凋落物层以及整个植被(乔木层+林下植被层+凋落物层)碳密度均不存在显著差异($P > 0.05$)。

补植木荷 8 a 后,尽管补植样地与对照样地的乔木层碳密度不存在显著差异($P > 0.05$),但其增量存在显著差异($P < 0.05$),补植样地的增量($31.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,包括木荷 $11.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)比对照

样地的($19.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)高出 62.01% ;对于林下植被层的碳密度,2021 年及其变化量补植样地与对照样地间均不存在显著差异($P>0.05$),且碳密度均有所减少,分别减少了 $1.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;2021 年补植样地的凋落物层碳密度显著高于对照样地($P<0.05$),较 2013 年分别提高了 $9.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $4.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,但其增长量差异并不

显著($P>0.05$);从植被(乔木层+林下植被层+凋落物层)碳密度看,2021 年补植样地与对照样地不存在显著差异($P>0.05$),但补植样地植被碳密度增量($39.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)比对照样地的($22.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)高 59.60% ,增长量呈极显著差异($P<0.01$)。可以看出,补植木荷对植被碳密度具有显著的增加作用。

表 3 湿地松平均胸径、平均单株材积及其增长量

Table 3 The average DBH and volume of individual tree and its growth

年份	平均胸径/cm		平均单株材积/ m^3	
	对照样地	补植样地	对照样地	补植样地
2013	13.1 ± 0.9^a	14.2 ± 1.1^a	0.0666 ± 0.0098^a	0.0820 ± 0.0114^a
2021	16.4 ± 1.5^b	18.4 ± 2.1^a	0.1151 ± 0.0264^a	0.1615 ± 0.0391^a
增长量	3.3 ± 0.9^a	4.2 ± 1.5^a	0.0485 ± 0.0191^a	0.0795 ± 0.0338^a

注:不同小写字母表示同一类型作业与对照差异显著($P<0.05$)。下同。

表 4 林下植被及凋落物碳含量

Table 4 Carbon content determination results of shrub grass and litter

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

样地类型	灌木			草本		凋落物
	叶	枝	根	地上	地下	
对照样地	447.95 ± 14.90^a	421.20 ± 23.33^a	394.20 ± 18.33^a	409.19 ± 7.87^a	349.84 ± 9.43^a	423.95 ± 34.78^a
补植样地	442.56 ± 20.18^a	402.92 ± 19.41^a	389.45 ± 14.06^a	407.70 ± 11.82^a	367.01 ± 14.47^a	437.86 ± 26.84^a

表 5 植被碳密度及其变化量

Table 5 Carbon density and its variation in vegetation

$\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$

层次	年份	对照样地	补植样地
乔木层	2013	29.11 ± 8.11^a	25.50 ± 8.44^a
	2021	48.46 ± 10.64^a	56.86 ± 10.53^a
	变化量	19.35 ± 5.00^b	31.36 ± 2.15^a
林下植被层	2013	2.61 ± 1.36^a	3.57 ± 1.49^a
	2021	1.59 ± 1.10^a	2.42 ± 1.70^a
	变化量	-1.02 ± 0.75^a	-1.15 ± 0.51^a
凋落物层	2013	3.84 ± 2.61^a	4.65 ± 3.71^a
	2021	8.23 ± 4.99^b	13.81 ± 2.98^a
	变化量	4.39 ± 2.66^a	9.16 ± 3.93^a
合计(植被)	2013	35.56 ± 10.28^a	33.85 ± 9.99^a
	2021	58.28 ± 13.54^a	73.09 ± 9.61^a
	变化量	22.72 ± 4.22^b	39.24 ± 3.98^A

注:不同大写字母表示同一类型作业与对照差异极显著($P<0.01$)。

2.2.2 土壤层碳密度 由图 1 可知,补植样地与对照样地的土壤碳密度均随土层深度的增加而逐渐降低,其中 $0\sim 10 \text{ cm}$ 土壤层碳密度最大。2013、2021 年补植样地与对照样地的 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30 \text{ cm}$ 以及 $0\sim 30 \text{ cm}$ 土层的碳密度及其增量均不存在显著差异($P>0.05$),但补植木荷 8 a 后,补植样地各土层碳密度的增量比对照样地的增量分别高 134.01% 、 35.19% 、 22.38% 、 40.09% ,分别为 3.98 、 1.64 、 0.96 、 $5.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中,以 $0\sim 10 \text{ cm}$

土壤层碳密度增加最为明显。因此,补植木荷有利于提升湿地松林土壤的固碳功能,尤其是 $0\sim 10 \text{ cm}$ 表土层碳密度的提高最为明显。

2.2.3 林分总碳密度 林分总碳密度(植被与土壤碳密度之和)及变化量见图 2。由图 2 可知,2013 年补植样地与对照样地林分总碳密度分别为 $69.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $63.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,两者间不存在显著差异($P>0.05$),其植被碳密度分别占林分总碳密度的 48.61% 和 55.73% ;2021 年补植样地与对照样地林分总碳密度分别为 $121.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $99.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,两者间存在显著差异($P<0.05$),其植被碳密度分别占林分总碳密度的 60.00% 和 58.75% 。从增量看,2013、2021 年,补植样地与对照样地的增长量分别为 $57.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $35.39 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,存在显著差异($P<0.05$),与对照样地相比,补植样地林分总碳密度增长量提高了 41.31% 。可见,补植木荷能够显著提升林分总碳密度,增强林分的固碳能力。

3 讨论

3.1 营造针阔混交林对林木生长的影响

本研究发现,补植木荷 8 a 后,湿地松的平均胸径有显著增大($P<0.05$),其湿地松的平均单株材积增长量也高于对照样地,比没有补植木荷的提高了 63.92% ,表明补植木荷对湿地松的生长具有一

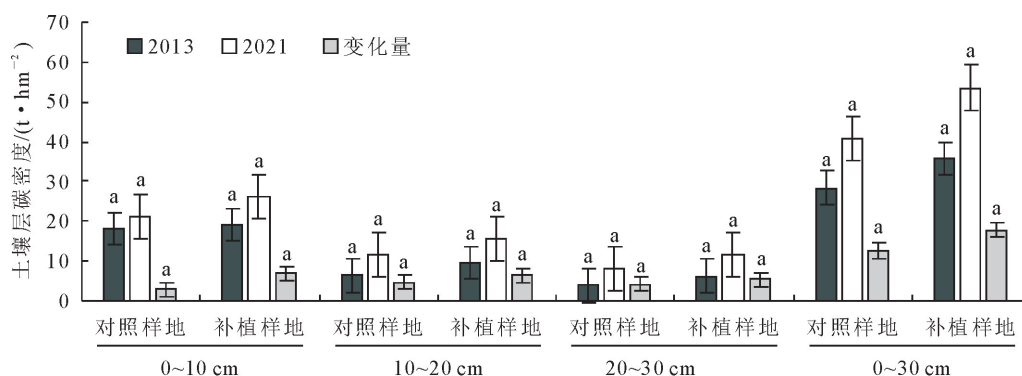


图1 土壤碳密度及其变化量

Fig. 1 Soil carbon density and its change

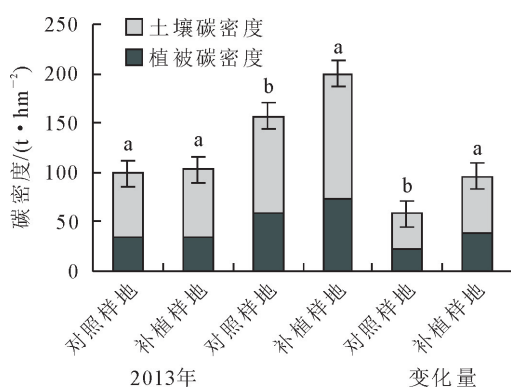


图2 林分总碳密度及其变化量

Fig. 2 Total carbon density and its variation

定的促进作用,这与许多学者得出的结论一致。如郭丽玲等^[24]研究表明间伐后补植木荷对马尾松低效林的生长具有显著的增加作用;方碧江^[25]研究杉木与灰木莲(*Manglietia glauca*)混交得出,混交林中杉木的树高、胸径、单株材积均高于杉木纯林;刘涛等^[26]选用杉木与观光木(*Michelia odorum*)进行异龄复层混交得出,混交林中林木的树高、胸径均显著高于纯林;王良衍等^[27]对次生马尾松、金钱松(*Pseudolarix amabilis*)进行针阔异龄混交林改造,改造完发现林分平均蓄积年生长量比改造前提高50%。究其原因可能是针叶纯林补植阔叶树种,营造针阔混交林,阔叶树的凋落物的分解,加快了营养元素的释放与归还,有助于土壤养分的积累,提高了土壤肥力,从而促进林木的生长^[28],且这阶段补植的幼树在竞争养分、水等资源能力相对较低,而大树因长期的生存和生长使其适应了当地的环境,并且占据了适宜的生态位,两者对邻近的资源可以相互分享和协调,彼此间在养分等环境竞争中几乎互不干扰^[29]。研究表明,补植的密度不同对林木生长产生的效果存在差异,如黄云鹏^[30]研究杉木与红锥不同比例混交得出,在相似的郁闭度下,7杉3锥混交比例(造林密度2100株·hm⁻²)的效果最佳,这与

本研究结果有所差异,原因可能是由于树种组成及其年龄等不同所导致,在本研究中,木荷是后来补植,补植密度虽然较大,但还是能促进林木的生长,这可能是补植后的时间还不够长,其补植树种还未进入主林层,未来木荷进入主林层后,林分空间结构与环境均会发生变化,后期林木生长状况如何变化将有待进一步调查分析。

3.2 营造针阔混交林对林分碳密度的影响

本研究表明,补植木荷8a后,补植样地植被碳密度(乔木层+林下植被层+凋落物层)增长量与对照样地存在极显著差异性($P < 0.01$)。其中,乔木层碳密度显著增加,补植的木荷已经发挥其固碳效益,这与明安刚等^[15]研究结果类似,其生物量增加速度加快的主要原因可能是补植乡土阔叶树种后,主林层生物量增加,且补植树种快速生长共同促使乔木层碳密度总量增加;补植样地与对照样地湿地松林林下植被碳密度均减少,补植样地减少量大于对照样地,这可能是因为由于林木的生长林分郁闭度逐渐增大,光照的减少使得林下植被层生长受限^[31],崔秋芳等^[32]研究也表明人为干扰与林分郁闭度增大会影响林下植被的生长,从而影响林下植被的固碳;而凋落物碳密度增加的原因可能是当年湿地松林下被清理了部分凋落物,随着林木的生长尤其是补植木荷后而增大了凋落物的积累,这与林德喜等^[33]研究结果类似。本研究表明,补植木荷8a后0~10cm土壤层碳密度增量明显高于对照样地,而10~20、20~30cm增量与对照样地无明显差异。原因可能是因为补植木荷后凋落物量增加,而凋落物的分解是有机质增加的重要来源,其分解对土壤表层的有机质积累影响比较明显^[34]。可见,湿地松纯林通过补植木荷改造成针阔混交林可以显著促进林分碳密度增加,这与郭春燕等^[35]研究得出的结论类似,但也有学者得出不同的结果,如郭丽玲等^[24]研究间伐补植木荷对马尾松林分总碳密度的

短期影响得出,实施间伐补植措施 4 年后马尾松低效林分总碳密度降低,这可能是因为补植后的时间短,同时间伐导致大量碳的损失还未能恢复。

4 结论

通过对湿地松纯林(对照样地)和补植 2 年生木荷(补植样地)8 a 后的分析,得出以下结论:1)补植木荷后能够有效促进湿地松林林木生长;2)补植木荷可显著促进植被(乔木层+林下植被层+凋落物层)碳密度增加,其中增加最为明显的为乔木层与凋落物层,林下植被碳密度有所减少;3)补植木荷可促进土壤碳密度增加,其中增加最为明显的为 0~10 cm 土层;4)补植木荷显著提高了林分总碳密度,补植样地的植被与土壤碳密度分别比对照样地增加了 59.60% 和 40.09%,但随着木荷的生长,林分结构将发生变化,后期对湿地松林林木生长及林分碳密度的影响有待通过较长期时期的监测以进一步分析。

参考文献:

- [1] SCHLAMADINGER B, BIRD N, JOHNS T, *et al.* A synopsis of land use, land-use change and forestry (LULUCF) under the kyoto protocol and marrakech accords[J]. *Environmental Science & Policy*, 2007, 10(4): 271-282.
- [2] 王晓慧, 陈永富, 刘华, 等. 基于森林资源二类调查数据的森林碳储量和固碳潜力评估——以西藏自治区扎囊县为例[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(4): 125-131.
WANG X H, CHEN Y F, LIU H, *et al.* Forest carbon storage and carbon sequestration potential assessment based on forest resource inventory data—a case study of Zhanang county, Tibet Autonomous Region[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(4): 125-131. (in Chinese)
- [3] 王有良, 林开敏, 宋重升, 等. 间伐对杉木人工林生态系统碳储量的短期影响[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(3): 65-73.
WANG Y L, LIN K M, SONG C S, *et al.* Short-term effects of thinning on carbon storage in Chinese fir plantation ecosystem[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2022, 46(3): 65-73. (in Chinese)
- [4] RUIZ-PEINADO R, BRAVO-OVIEDO A, LOPEZ-SENES-PLEDA E, *et al.* Do thinnings influence biomass and soil carbon stocks in mediterranean maritime pinewoods? [J]. *European Journal of Forest Research*, 2013, 132(2): 253-262.
- [5] 张凌宇, 赵庆, 吴晓君, 等. 广东西樵山国家森林公园森林碳储量空间分布研究[J]. *森林工程*, 2023, 39(5): 48-56.
- [6] DIB A E, JOHNSON C E, DRISCOLL C T, *et al.* Simulating effects of changing climate and CO₂ emissions on soil carbon pools at the hubbard brook experimental forest[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1643-1656.
- [7] HAYES D J, TURNER D P, STINSON G, *et al.* Reconciling estimates of the contemporary north american carbon balance among terrestrial biosphere models, atmospheric inversions, and a new approach for estimating net ecosystem exchange from inventory-based data[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1282-1299.
- [8] 张佳薇, 谈志强, 杨春梅, 等. 基于石英增强型光声光谱技术的植株固碳检测系统[J]. *森林工程*, 2021, 37(6): 62-67.
- [9] KAUPPI P E, SAL G, ARNESSON-CEDER L, *et al.* Managing existing forests can mitigate climate change[J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 513: 120186.
- [10] 朱坤, 彭建松, 张文莉, 等. 曲靖市森林生态系统固碳释氧的生态效益[J]. *森林工程*, 2022, 38(2): 34-43.
- [11] DU H, WANG K L, PENG W X, *et al.* Spatial heterogeneity of soil mineral oxide components in depression between Karst hills, Southwest China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(2): 163-179.
- [12] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 等. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 811-820.
PENG W X, WANG K L, SONG T Q, *et al.* Controlling and restoration model of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 811-820. (in Chinese)
- [13] 赖国桢, 曹梦, 潘萍, 等. 马尾松木荷不同比例混交林植被碳密度特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(2): 108-113.
LAI G Z, CAO M, PAN P, *et al.* Carbon density of mixed plantation of *Pinus massoniana* and *Schima superba* in different proportions[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, 38(2): 108-113. (in Chinese)
- [14] 卢立华, 郭文福, 蔡道雄, 等. 马尾松与红椎纯林及混交林生态系统碳储量研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(7): 78-84.
LU L H, GUO W F, CAI D X, *et al.* Study on carbon storage of monoculture and mixed plantation of *Pinus massoniana* and *Castanopsis hystrix* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(7): 78-84. (in Chinese)
- [15] 明安刚, 刘世荣, 李华, 等. 近自然化改造对马尾松和杉木人工林生物量及其分配的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(23): 7833-7842.
MING A G, LIU S R, LI H, *et al.* Effects of close-to-nature transformation on biomass and its allocation of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7833-7842. (in Chinese)
- [16] 苏仁峰, 易敏, 张露, 等. 针叶性状与湿地松产脂能力关系[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(4): 910-918.
SU R F, YI M, ZHANG L, *et al.* Relationship between resin yield and needle traits of *Pinus elliottii* [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(4): 910-918. (in Chinese)
- [17] 高启阳, 黄宇龙, 郭文冰, 等. 碳源等因素对湿地松优良无性系胚性愈伤组织增殖的影响[J]. *植物研究*, 2022, 42(1): 21-28.
GAO Q Y, HUANG Y L, GUO W B, *et al.* Effects of carbon source and other factors on the proliferation of embryogenic callus of elite clone of *Pinus elliottii* [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2022, 42(1): 21-28. (in Chinese)
- [18] 吴宏伟, 田意, 黄光灿, 等. 基于非线性度量误差的湿地松生长模型[J]. *林业资源管理*, 2019(6): 69-74.

- WU H W, TIAN Y, HUANG G C, *et al.* A growth for *Pinus elliottii* based on the nonlinear measurement error method [J]. *Forestry Resources Management*, 2019 (6): 69-74. (in Chinese)
- [19] 李轩然, 刘琪璟, 胡理乐, 等. 不同方法计算湿地松林生物量的比较[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1594-1598.
- LI X R, LIU Q J, HU L L, *et al.* Calculation of *Pinus elliottii* biomass: a comparison of different methods [J]. *Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1594-1598. (in Chinese)
- [20] 国家林业和草原局. 立木生物量模型及碳计量参数-湿地松, LY/T 2261-2014[S]. 北京: 中国标准出版, 2014.
- [21] 国家林业和草原局. 立木生物量模型及碳计量参数-木荷, LY/T 2660-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [22] 王兵, 魏文俊. 江西省森林碳储量与碳密度研究[J]. *江西科学*, 2007, 25(6): 681-687.
- WANG B, WEI W J. Carbon storage and density of forests in Jiangxi Province [J]. *Jiangxi Science*, 2007, 25 (6): 681-687. (in Chinese)
- [23] MURILLO J. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 33(1): 53-61.
- [24] 郭丽玲, 潘萍, 欧阳勋志, 等. 间伐补植对马尾松低效林生长及林分碳密度的短期影响[J]. *西南林业大学学报*, 2019, 39(3): 48-54.
- GUO L L, PAN P, OUYANG X Z, *et al.* Short-term effects of thinning and replanting measures on tree growth and stand carbon density of low-efficiency *Pinus massoniana* forest [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2019, 39 (3): 48-54. (in Chinese)
- [25] 方碧江. 杉木灰木莲混交林生长情况及土壤理化性质[J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(1): 46-52.
- FANG B J. Analyses on growth and soil physical and chemical properties of *Cunninghamia lanceolata* and *Manglietia glauca* mixed forest [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42(1): 46-52. (in Chinese)
- [26] 刘涛, 王家妍, 李万年, 等. 杉木×观光木异龄复层混交对林木生长及土壤理化性质的影响[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37 (1): 125-130.
- LIU T, WANG J Y, LI W N, *et al.* Growth and soil physico-chemical properties in the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum* in different aged and multi-layer forests [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(1): 125-130. (in Chinese)
- [27] 王良衍, 杨晓东, 曹立光. 次生马尾松、金钱松混交林的针阔异龄混交林改造成效研究[J]. *浙江林业科技*, 2013, 33(2): 47-51.
- WANG L Y, YANG X D, CAO L G. Transformation of secondary mixed forest of *Pinus massoniana* and *Pseudolarix amabilis* to conifer-broadleaf unevenaged forest [J]. *Journal of Zhejiang for Science. & Technology*, 2013, 33(2): 47-51. (in Chinese)
- [28] 贺红月, 牟洪香, 马长明, 等. 华北落叶松与胡枝子叶凋落物混合分解及其对土壤养分的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2018, 41(5): 55-61.
- HE H Y, MOU H X, MA C M, *et al.* The decomposition characteristics and their effect on soil nutrients of leaf litter-mixtures of *Larix principis-rupprechtii* and *Lespedeza bicolor* [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2018, 41 (5): 55-61. (in Chinese)
- [29] 邱婧, 韩安霞, 何春梅, 等. 秦岭优势乔木锐齿槲栎的空间分布格局及种内关联[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2035-2042.
- QIU J, HAN A X, HE C M, *et al.* Spatial distribution pattern and intraspecific association of dominant species *Quercus aliena* var. *acuteserrata* in Qinling Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(8): 2035-2042. (in Chinese)
- [30] 黄云鹏. 杉木与红锥混交林生长量及混交比例的研究[J]. *福建林学院学报*, 2008, 28(3): 367-371.
- HUANG Y P. Study on growth increment and mixed ratio of a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis hystrix* [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2008, 28 (3): 367-371. (in Chinese)
- [31] 吴载璋. 马尾松林冠下套种阔叶树对林下植被的影响[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(4): 393-397.
- WU Z Z. Spatial and temporal undergrowth patterns after interplanting broad-leaved trees under a *Pinus massoniana* canopy [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(4): 393-397. (in Chinese)
- [32] 崔秋芳, 赵佳宝, 陈家林, 等. 不同林龄阶段的松栎混交人工林碳储量研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 1944-1949.
- CUI Q F, ZHAO J B, CHEN J L, *et al.* Study on carbon storage of a mixed pine-oak mixed plantation based on different ages [J]. *Ecological and Environment Sciences*, 2015, 24(12): 1944-1949. (in Chinese)
- [33] 林德喜, 樊后保. 马尾松林下补植阔叶树后森林凋落物量、养分含量及周转时间的变化[J]. *林业科学*, 2005, 41(6): 10-18.
- LIN D X, FAN H B. Changes in amount, nutrient content and turnover time of forest litter after interplanting hardwood species under masson pine stand [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(6): 10-18. (in Chinese)
- [34] 沈沈阳, 白彦峰, 靳云铎, 等. 凋落物添加对不同龄级杉木林土壤养分与微生物特性的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(3): 114-125.
- SHEN Y Y, BAI Y F, JIN Y D, *et al.* Effects of litter addition on the soil nutrients and microbial properties in *Cunninghamia lanceolata* plantations of different stand ages [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(3): 114-125. (in Chinese)
- [35] 郭春燕, 曹银贵, 武玉珍, 等. 安太堡露天煤矿刺槐人工林乔木层碳密度动态特征[J]. *山西大学学报: 自然科学版*, 2022, 45 (2): 487-493.
- GUO C Y, CAO Y G, WU Y Z, *et al.* Carbon density dynamics of the tree layer of *Robinia pseudoacacia* plantation in antaibao opencast coal mine [J]. *Journal of Shanxi University: Nat. Sci. Ed.*, 2022, 45(2): 487-493. (in Chinese)