

## ◆ 森林生态 ◆

近自然经营对马尾松人工林生态系统碳储量的影响<sup>\*</sup>邹丰虎, 柴宗政<sup>\*\*</sup>

(贵州大学林学院, 贵州贵阳 550025)

**摘要:**探究近自然经营对马尾松(*Pinus massoniana*)人工林生态系统碳储量的影响,可为马尾松林固碳增汇和可持续经营提供实践基础和科学依据。本研究以贵州省贵阳市开阳县龙岗镇马尾松人工林为研究对象,采用成对 *t* 检验方法对比分析近自然经营 10 余年后不同林分发展阶段马尾松人工林对照林分和近自然经营林分(以下简称“经营林分”)中植被层、枯落物层、土壤层碳储量的变化规律。结果表明:①近自然经营能够改变马尾松人工林生态系统不同层次碳储量的占比,但是生态系统碳储量总体依然呈现土壤层>乔木层>枯落物层>灌木层>草本层的分配规律。②马尾松人工林在不同林分发展阶段生态系统碳储量均为经营林分显著大于对照林分,表明近自然经营后相对较长的时期内能够有效提升生态系统碳储量。③植被层碳储量在中龄林阶段经营林分显著大于对照林分;枯落物层碳储量在 3 个林分发展阶段对照林分和经营林分无显著差异;土壤层碳储量在近熟林阶段经营林分显著大于对照林分。综上,近自然经营对马尾松人工林生态系统固碳能力的提升具有一定效果,后续还可以通过补植枫香(*Liquidambar formosana*)、白栎(*Quercus fabri*)和麻栎(*Q. acutissima*)等乡土阔叶树种来提高物种多样性,促进马尾松林生态系统林分生长和碳累积。本研究对马尾松林及其他人工林的经营管理具有一定的科学参考意义。

**关键词:**近自然经营;马尾松人工林;林分发展阶段;生态系统碳储量

中图分类号:S753.5 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)03-0405-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20240910.001

森林生态系统碳储量是陆地生态系统碳库中最大、最活跃的组成部分。全球森林碳储量高达 662 Gt,平均每公顷森林碳储量达 163 t<sup>[1]</sup>,森林在吸收二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、减缓全球气候变暖等方面发挥着不可替代的作用<sup>[2-5]</sup>。过去几十年,森林通过对 CO<sub>2</sub> 的净

吸收,有效减缓了气候变暖,但并没有改变大气中 CO<sub>2</sub> 仍在不断积累的现实<sup>[6]</sup>。目前,通过维持和提高现存生态系统碳储量从而降低 CO<sub>2</sub> 浓度是缓解全球气候变暖的主要途径<sup>[7]</sup>。作为地球最主要的碳库之一,近年来森林的砍伐速度明显减缓,但总体砍伐

收稿日期:2024-02-19

修回日期:2024-07-10

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(32001314),贵州省林业科研项目(黔林科合[2022]38号)和贵州大学培育项目(贵大培育[2019]38号)资助。

## 【第一作者简介】

邹丰虎(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事森林可持续经营与生态建模研究,E-mail:fhzhou97@163.com。

## 【\*\*通信作者简介】

柴宗政(1986—),男,副教授,主要从事森林可持续经营与生态建模研究,E-mail:chaizz@126.com。

## 【引用本文】

邹丰虎,柴宗政.近自然经营对马尾松人工林生态系统碳储量的影响[J].广西科学,2024,31(3):405-415.

ZOU F H, CHAI Z Z. Effects of Close-to-Nature Management on Carbon Storage of *Pinus massoniana* Plantation Ecosystem [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(3): 405-415.

量仍然很高<sup>[8]</sup>,特别是对用材林的砍伐,导致现有用材林普遍偏中幼龄林化,单位面积森林的固碳能力没有得到充分发挥。

马尾松(*Pinus massoniana*)是中国南方地区分布最广、资源最多、种植面积最大的乡土造林用材树种,也是国家木材贮备工程中占比较大的树种之一,广泛分布于17个省区市。贵州省第四次森林资源二类调查结果显示,马尾松人工林面积 $160.18 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,蓄积量 $153.71 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,分别占全省森林面积和蓄积量的23.98%和29.45%,在森林生态系统中扮演着至关重要的角色<sup>[9]</sup>。马尾松在优质木材市场占据着重要地位<sup>[10-12]</sup>,然而马尾松人工林大多存在多样性低、纯林化高、大径级材供应能力差、生产力低下等问题<sup>[13,14]</sup>,这使得马尾松人工林的经济效益和生态服务功能难以得到充分发挥。随着全球气候变暖,人们也在不断探索森林经营如何应对这一变化。可以确定的是森林功能不再是单调地持续性供应木材,固碳释氧的任务也将越来越重,增强森林固碳能力在一定程度上减缓气候变暖、维持全球碳平衡。当下,如何优化马尾松人工林各层次碳储量分配、增强森林生态系统固碳能力是马尾松人工林经营管理的重点方向。

近自然经营理念强调森林经营的全周期性,采取持续性森林抚育为主要技术手段<sup>[15]</sup>。国外有关近自然经营模式在森林经营方面的研究已取得许多成功经验,证实了近自然经营是一种兼顾森林生态效益和经济效益的经营模式<sup>[16]</sup>,受到学者们的一致关注,并逐步将近自然经营理念与技术应用到国内的森林经营管理中<sup>[17-21]</sup>。近年来,有关近自然经营在马尾松人工林经营管理过程中的研究并不少见,但大多是关于林下植被<sup>[20]</sup>、根系<sup>[22]</sup>或土壤<sup>[23]</sup>、物种多样性<sup>[24,25]</sup>及林木生长<sup>[20]</sup>等方面,针对马尾松人工林生态系统碳储量的研究较少,而关于贵州省中部地区近自然经营对马尾松人工林生态系统碳储量的影响研究目前暂未发现。经营措施通过直接影响林分群落结构从而间接影响森林碳储量,研究近自然经营对马尾松人工林生态系统碳储量的影响,对以碳储量提升为目标的森林经营具有指导意义。因此,本研究以贵州省中德财政合作项目区不同林分发展阶段马尾松人工林为研究对象,采用成对 $t$ 检验方法对比分析近自然经营10余年后马尾松人工林对照林分和近自然经营林分(以下简称“经营林分”)中植被层、枯落物层、土壤层碳储量的变化规律,目的是明确近自然经营对马尾松

人工林生态系统碳储量的影响,以期为研究区马尾松人工林固碳增汇及可持续经营提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本研究依托中德财政合作贵州森林可持续经营项目,以贵州马尾松近自然经营试验示范区为研究区域。该区域位于贵阳市开阳县龙岗镇,属黔中高原区,主要地貌类型为低山、中山及丘陵,地势起伏较大,地下暗河伏流,地面山坡、河流、沟谷镶嵌分布,平均海拔1200 m左右。属亚热带季风湿润气候,冬无严寒,夏无酷暑,年平均气温 $15.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。气候温和,少有冻害,年平均无霜期在300 d以上,年平均降水量1200 mm,雨热同季,雨量充沛。土壤类型有黄壤和石灰土,主要为酸性黄壤,土壤母质以砂页岩、石灰岩、白云岩为主。森林类型以马尾松、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等人工针叶林为主,另外还有枫香(*Liquidambar formosana*)、白栎(*Quercus fabri*)、麻栎(*Q. acutissima*)等阔叶树种。

### 1.2 近自然经营措施

中德财政合作贵州森林可持续经营项目于2009年在贵阳试点林区展开,根据研究区马尾松人工林林分平均胸径(DBH)划分不同林分发展阶段,并基于目标树单株采伐作业体系,制定相应经营措施。

针对平均 $\text{DBH} < 5 \text{ cm}$ 的幼龄林,经营目的为提升林木质量,调整混交结构,经营措施是伐除霸王木及弯曲、干形差的林木,目标密度控制在2500株/ $\text{hm}^2$ ;针对 $5 \text{ cm} \leq \text{平均 DBH} < 15 \text{ cm}$ 的中龄林,主要为了降低立木密度,促进保留木生长,通过目标树与间伐密度控制2种方式相结合,目标密度控制在1200—1700株/ $\text{hm}^2$ ,同时经营过程中保持采劣留优、采密留疏、采针留阔,改善林分质量,保护林下天然更新;针对 $15 \text{ cm} \leq \text{平均 DBH} < 34 \text{ cm}$ 的近熟林,主要为了收获少量中小径材,同时促进保留木生长,通过目标树与间伐密度控制2种方式相结合,目标密度控制在300—850株/ $\text{hm}^2$ ,对每株目标树,伐除2株左右的干扰木,以促进其生长。

### 1.3 样地设置与调查

2022年8月,根据研究区马尾松人工林分布及近自然经营实施情况,按林龄梯度设置24组样地(1组样地包含1个经营样地和1个对照样地,对照样地选择人为干扰相对较小且未实施经营的林分,两个样地具有相同的林龄和相近的立地条件),包含5

组幼龄林、11组中龄林和8组近熟林,共计48个样地。布设圆形样地进行调查,半径为14.57 m,面积为667 m<sup>2</sup>(约1亩)。每个圆形样地内均匀布设9个同心样圆,圆心间距为5 m,圆心用PVC管固定,其中大样圆(4 m<sup>2</sup>)调查灌木和更新,小样圆(2 m<sup>2</sup>)调查草本植物,另外布设4个面积为1 m<sup>2</sup>的样圆调查土壤和枯落物。对样地内所有DBH≥5 cm的立木

表1 样地基本概况

Table 1 Basic overview of sample sites

林分发展阶段 Stage of stand development	处理 Treatment	样地数量 Number of plots	林龄/年 Stand age/year	海拔/m Altitude/m	坡度/° Slope/°	密度/ (株/hm <sup>2</sup> ) Density/ (Individual/hm <sup>2</sup> )	郁闭度 Canopy density	平均胸径/cm Mean DBH/cm	平均树高/m Mean tree height/m
Young forest	Control	5	15-17	1 138-1 274	2-25	765-1 965	0.7-0.9	11.8-14.4	11.2-12.9
	Management	5	15-17	1 065-1 300	2-20	1 155-1 905	0.7-0.9	13.5-15.9	13.4-14.8
Middle-aged forest	Control	11	18-28	1 091-1 298	2-25	630-1 365	0.7-0.8	12.7-21.3	11.5-18.2
	Management	11	18-28	1 070-1 331	2-40	480-1 125	0.6-0.7	17.6-21.4	15.6-17.7
Near-mature forest	Control	8	31-50	1 077-1 210	2-20	555-1 275	0.6-0.8	17.3-27.9	13.6-19.8
	Management	8	31-50	1 064-1 227	0-35	435-840	0.6-0.7	20.8-26.8	16.9-21.5

Note: stand age is the actual age of the stand in 2022.

#### 1.4 样品采集与处理

选择4个与圆心距离相同的同心圆进行采样,4 m<sup>2</sup>样圆内调查灌木生物量;2 m<sup>2</sup>样圆内调查草本生物量。采用刈割法,将每个样方中灌木、草本的地上部分和地下部分分别称重后取样,灌木取400-500 g,草本取150-250 g。将灌木、草本的地上部分和地下部分样品分别称重,记录并装袋保存。在1 m<sup>2</sup>样圆内,首先收集所有的枯落物,全部称重并取部分作为样品装袋;然后按0-20、20-40、40-60 cm的土层厚度对土壤进行采样。将所有植物、枯落物及土壤样品带回实验室。植物样品放入烘箱内,经85℃恒温烘至恒重,称干重后经植物粉碎机磨碎过60目筛,保存于塑封袋中;土壤去除生物残体、石砾后,室内自然风干过60目筛,保存于塑封袋中。植物、枯落物、土壤样品碳含量均采用重铬酸钾-外加热法测定,每个样品测定3次;土壤容重采用环刀法测定。

#### 1.5 碳储量计算

##### 1.5.1 植被层碳储量计算

乔木层采用《贵州省单株碳汇项目方法学(编号201712-V1)》<sup>[26]</sup>中各树种的生物量模型和含碳率计算单木碳储量,并推算样地碳储量。灌草及枯落物碳储量根据林地单位面积生物量、含碳率以及样地面积计算,公式如下:

$$C = B \times CF \times S, \quad (1)$$

使用全站仪[TOPCON-GTS-602AF,拓普康(北京)科技发展有限公司]进行每木定位,实测胸径、树高、冠高、枝下高、冠幅、林木质量、病虫害状况、生活力并进行林木分级。在4 m<sup>2</sup>样圆内对灌木的种类、株高、株数、盖度和病虫害状况等进行调查。在2 m<sup>2</sup>样圆内调查草本植物的种类、株高、株数、盖度和病虫害状况。样地基本概况见表1。

式中, $C$ 为样地碳储量(t); $B$ 为林分中平均单位面积生物量(t/hm<sup>2</sup>); $CF$ 为含碳率(%); $S$ 为样地面积。

##### 1.5.2 土壤层碳储量计算

土壤层碳储量根据土壤有机碳密度及样地面积获得,计算公式如下:

$$C_{\pm} = D_{\text{soc}} \times S, \quad (2)$$

$$D_{\text{soc}} = \sum_{i=1}^n B_i \times C_i \times D_i / 10, \quad (3)$$

式中, $C_{\pm}$ 为样地中土壤碳储量(t); $D_{\text{soc}}$ 为不同森林类型土壤有机碳密度(t/hm<sup>2</sup>); $B_i$ 为第*i*层的土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $C_i$ 为第*i*层的土壤有机碳含量(g/kg); $D_i$ 为第*i*层的土壤厚度(cm)。

##### 1.5.3 生态系统碳储量计算

生态系统碳储量为植被层、枯落物层和土壤层碳储量之和。

#### 1.6 数据处理

利用Excel 2019进行数据统计,采用R 4.3.2进行*t*检验及制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 近自然经营对马尾松人工林植被层碳储量的影响

不同林分发展阶段马尾松人工林经营林分乔木层碳储量均大于对照林分。对照林分幼龄林、中龄

林、近熟林阶段乔木层碳储量分别为 3.958、4.413、6.693 t; 经营林分幼龄林、中龄林、近熟林阶段乔木层碳储量分别为 4.780、5.357、6.722 t, 中龄林阶段的经营林分与对照林分乔木层碳储量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 而幼龄林与近熟林阶段无显著差异 [表 2, 图 1(a)]。乔木层碳储量在生态系统中的占比超过 35%, 总体随林龄增加而增大。近自然经营 10 余年后, 幼龄林、中龄林、近熟林经营林分与对照林分乔木层碳储量百分比差值分别为 1.41%、1.21%、-6.30% (表 2)。整体来看, 研究区马尾松人工林乔木层碳储量表现为经营林分大于对照林分, 表明近自然经营对研究区马尾松人工林乔木层碳储量提升具有正向作用。

对照样地幼龄林、中龄林、近熟林阶段灌木层碳储量分别为 0.011、0.035、0.040 t, 经营样地幼龄林、中龄林、近熟林阶段碳储量分别为 0.016、0.031、0.049 t, 其中幼龄林阶段经营林分灌木层碳储量显著大于对照林分 ( $P < 0.05$ ), 近熟林阶段经营林分灌木层碳储量极显著大于对照林分 ( $P < 0.01$ )。与对照林分相比, 灌木层生态系统碳储量幼龄林升高 0.03%、中龄林降低 0.07%、近熟林升高 0.02% [表 2, 图 1(b)]。近自然经营 10 余年后, 灌木层总碳

储量明显提升。

近自然经营能显著改善马尾松人工林林下的环境条件, 促使林下草本层植物快速生长, 从而使草本层碳储量发生变化。幼龄林、中龄林和近熟林阶段对照林分草本层碳储量分别为 0.009、0.039、0.035 t, 经营林分草本层碳储量分别为 0.010、0.025、0.057 t, 中龄林阶段对照林分草本层碳储量显著大于经营林分 ( $P < 0.05$ ), 而近熟林阶段经营林分乔木层碳储量极显著大于对照林分 ( $P < 0.01$ ) [表 2, 图 1(c)]。草本层碳储量占比在中龄林阶段降低 0.15%, 在近熟林阶段升高 0.10% (表 2)。草本层总碳储量表现为经营林分大于对照林分。

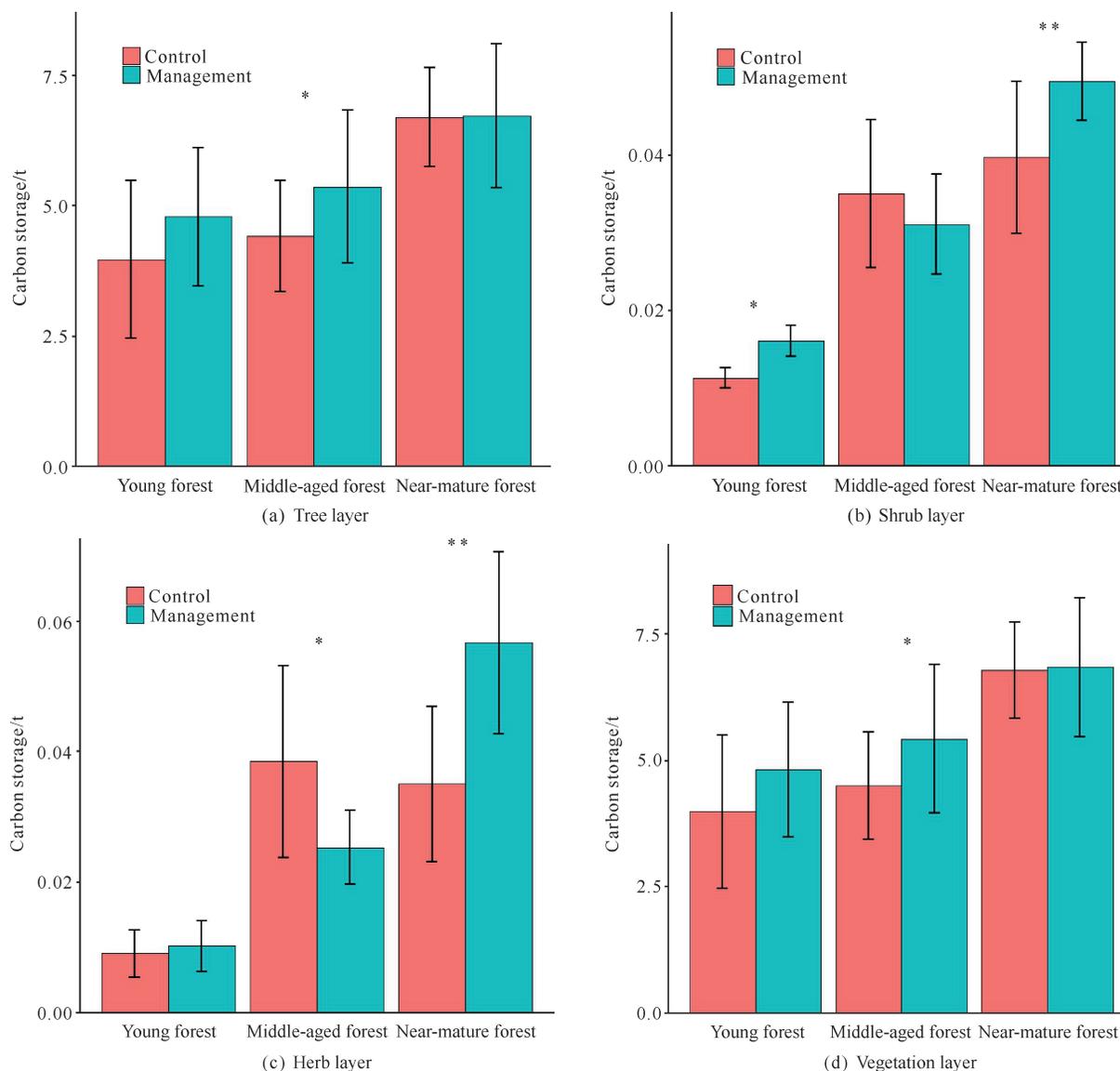
不同林分发展阶段(幼龄林、中龄林、近熟林)马尾松人工林对照林分植被层碳储量分别为 3.978、4.487、6.768 t, 经营林分植被层碳储量分别为 4.806、5.414、6.829 t (表 2)。如图 1(d) 所示, 植被层碳储量在中龄林阶段存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。与对照林分相比, 经营林分碳储量占比在幼龄林阶段升高 1.43%, 在中龄林阶段升高 1.00%, 在近熟林阶段降低 6.17% (表 2)。植被层碳储量及占比的变化规律与乔木层基本一致。

表 2 不同林分发展阶段马尾松人工林各层碳储量及百分比

Table 2 Carbon storage and percentage in each layer of *P. massoniana* plantation at different development stages

Unit: t

林分发展阶段 Stage of stand development	处理 Treatment	植被层 Vegetation layer				枯落物层 Litter layer	土壤层 Soil layer				生态系统 Ecosystem
		乔木 Tree	灌木 Shrub	草本 Herb	小计 Total		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—60 cm	
Young forest	Control	3.958 (36.78%)	0.011 (0.10%)	0.009 (0.08%)	3.978 (36.97%)	0.311 (2.89%)	3.133 (29.11%)	2.042 (18.98%)	1.296 (12.04%)	6.472 (60.14%)	10.761 (100%)
	Management	4.780 (38.19%)	0.016 (0.13%)	0.010 (0.08%)	4.806 (38.40%)	0.314 (2.51%)	3.649 (29.16%)	2.084 (16.65%)	1.662 (13.28%)	7.395 (59.09%)	12.515 (100%)
Middle-aged forest	Control	4.413 (35.92%)	0.035 (0.29%)	0.039 (0.32%)	4.487 (36.53%)	0.278 (2.26%)	3.933 (32.02%)	2.030 (16.52%)	1.557 (12.68%)	7.520 (61.22%)	12.284 (100%)
	Management	5.357 (37.13%)	0.031 (0.22%)	0.025 (0.17%)	5.414 (37.53%)	0.288 (2.00%)	4.257 (29.51%)	2.401 (16.64%)	2.068 (14.33%)	8.725 (60.48%)	14.427 (100%)
Near-mature forest	Control	6.693 (48.85%)	0.040 (0.29%)	0.035 (0.26%)	6.768 (49.40%)	0.264 (1.93%)	3.358 (24.52%)	1.989 (14.52%)	1.322 (9.65%)	6.668 (48.67%)	13.700 (100%)
	Management	6.722 (42.55%)	0.049 (0.31%)	0.057 (0.36%)	6.829 (43.23%)	0.306 (1.94%)	4.184 (26.48%)	2.558 (16.19%)	1.922 (12.17%)	8.663 (54.84%)	15.798 (100%)



\* means significant difference ( $P < 0.05$ ), \*\* means extremely significant difference ( $P < 0.01$ ).

图 1 不同林分发展阶段马尾松人工林植被层碳储量

Fig. 1 Vegetation layer carbon storage of *P. massoniana* plantation at different development stages

## 2.2 近自然经营对马尾松人工林枯落物碳储量的影响

不同林分发展阶段(幼龄林、中龄林、近熟林)马尾松人工林对照林分枯落物碳储量依次为 0.311、0.278、0.264 t, 经营林分枯落物碳储量依次为 0.314、0.288、0.306 t, 均无显著性差异(表 2, 图 2)。与对照林分相比, 经营林分枯落物碳储量占比在幼龄林和中龄林阶段降低(-0.38%、-0.26%), 近熟林阶段有所升高(0.01%), 但碳储量总体表现为经营林分大于对照林分(表 2)。

## 2.3 近自然经营对马尾松人工林土壤层碳储量的影响

不同林分发展阶段马尾松人工林土壤层碳储量

如表 2 和图 3 所示。近熟林经营林分与对照林分土壤层碳储量分别为 8.663、6.668 t, 存在极显著差异( $P < 0.01$ )。幼龄林和中龄林经营林分的土壤层碳储量分别为 7.395、8.725 t; 对照林分分别为 6.472、7.520 t, 差异不显著。不同林分发展阶段土壤碳储量均随深度的增加而降低。土壤层碳储量平均占比超过 60%。与对照林分相比, 经营林分土壤层碳储量占比在幼龄林和中龄林阶段降低(-1.05%、-0.74%), 在近熟林阶段升高(6.17%)。从不同土层深度(0-20、20-40、40-60 cm)的碳储量来看, 大多存在中龄林>近熟林>幼龄林、经营林分>对照林分的规律。其中, 0-20 cm 土层深度仅近熟林存在显著差异( $P < 0.05$ ); 20-40 cm 土层深度近熟林

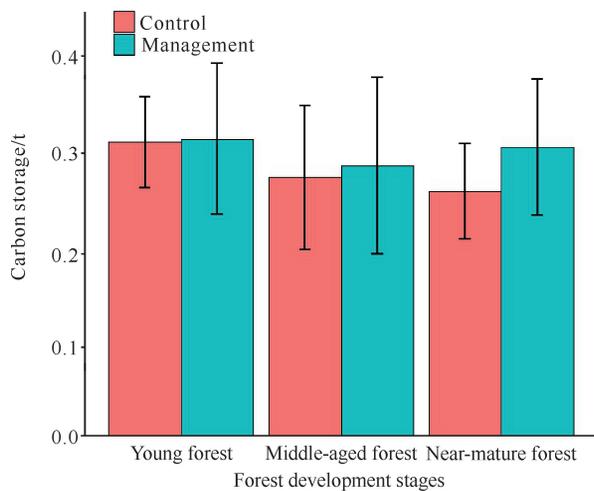
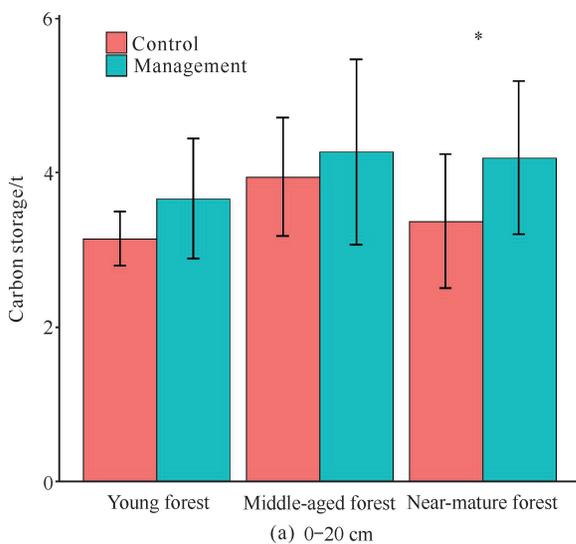


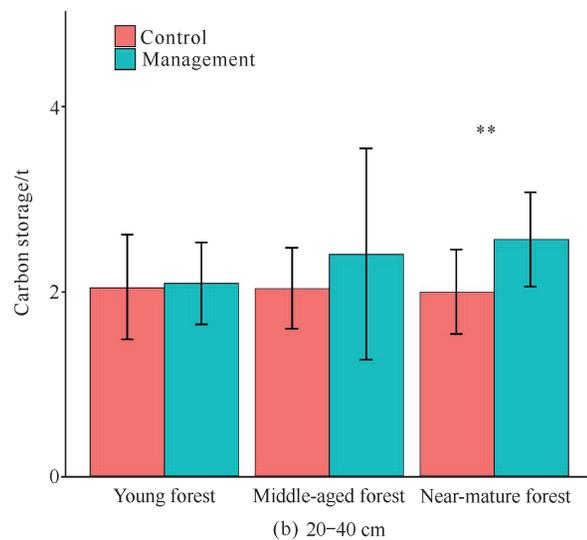
图2 不同林分发展阶段马尾松人工林枯落物层碳储量

Fig. 2 Carbon storage of litter layer in *P. massoniana*

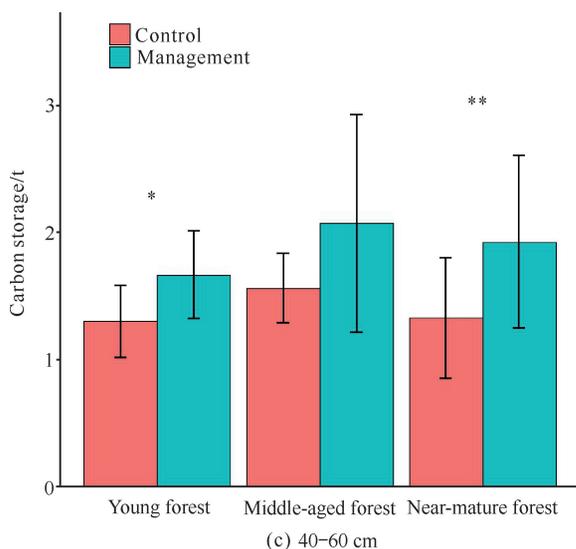
plantation at different development stages



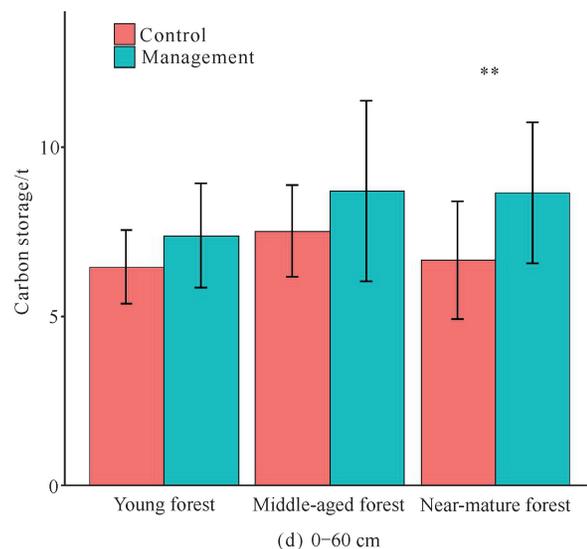
(a) 0-20 cm



(b) 20-40 cm



(c) 40-60 cm



(d) 0-60 cm

\* means significant difference ( $P < 0.05$ ), \*\* means extremely significant difference ( $P < 0.01$ ).

图3 不同林分发展阶段马尾松人工林土壤层碳储量

Fig. 3 Soil layer carbon storage of *P. massoniana* plantation at different development stages

存在极显著差异( $P < 0.01$ ); 40-60 cm 土层深度幼龄林存在显著差异( $P < 0.05$ ), 近熟林存在极显著差异  $P < 0.01$ 。整体上看, 不同林分发展阶段马尾松人工林土壤碳储量在近自然经营 10 余年后发生了明显变化, 经营林分与对照林分相比, 土壤碳储量明显增加, 且以近熟林最为显著。

#### 2.4 近自然经营对马尾松人工林生态系统碳储量的影响

马尾松人工林生态系统幼龄林、中龄林、近熟林的对照林分碳储量依次为 10.761、12.284、13.700 t; 经营林分碳储量依次为 12.515、14.427、15.798 t (表 2)。不同林分发展阶段均为经营林分碳储量显著大于对照林分( $P < 0.05$ , 图 4)。经营林分与对照

林分生态系统碳储量占比总体上表现为土壤层>乔木层>枯落物层>灌木层>草本层,以土壤层和乔木层为主要碳库(表2)。整体上看,生态系统碳储量经营林明显大于对照林分,表明近自然经营10余年后,马尾松人工林生态系统碳储量显著增加,各层次碳储量的占比发生明显变化。

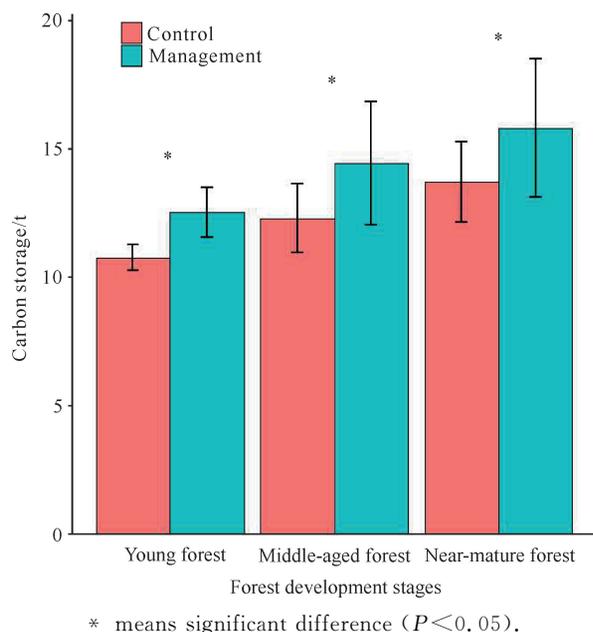


图4 不同林分发展阶段马尾松人工林生态系统碳储量

Fig. 4 Carbon storage of *P. massoniana* plantation ecosystem at different development stages

### 3 讨论

不同林分发展阶段马尾松人工林乔木层碳储量均呈经营林分大于对照林分的规律,与短期间伐后经营林分小于对照林分的研究结论<sup>[27,28]</sup>相反,主要是近自然经营通过改善林分结构提高林木的生长条件,经过10余年的生长,乔木层增加的碳储量弥补了伐除的碳储量后还有盈余,导致经营林分碳储量比对照林分更高,与Wang等<sup>[29]</sup>、董莉莉等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。乔木层碳储量增长量在中、幼龄林阶段最大,且存在显著差异,近熟林阶段最小,说明近自然经营对低龄林的长期影响更明显,这与间伐对低龄林的短期影响不明显,却对高龄林具有显著效果<sup>[31,32]</sup>的结论正好相反,可能是由于低龄林处于生长旺盛期,林木生长的影响大于经营伐除,而高龄林虽然不在生长旺盛期,但经过长期生长弥补了伐除量。导致本研究结果与短期间伐后结论不一致的原因还可能和林分的初植密度以及森林恢复时间长短有关。这也表明通过长期近自然经营,保持合理的林分密度和林分结

构,不仅能达到提升森林碳储量的目的,也能满足大径级用材培育的需求,与肖军等<sup>[33]</sup>、Bagdon等<sup>[34]</sup>的研究结论一致。

灌木层碳储量整体表现为经营林分(0.034 t)大于对照林分(0.032 t),表明近自然经营明显促进了灌木层碳储量的累积。幼龄林与近熟林经营林分碳储量显著大于对照林分,而中龄林对照林分大于经营林分,可能是由于幼龄林灌木较少,经营后促进了灌木的扎根和生长,而近熟林采伐干扰木腾出的空间较大,给灌木提供了良好的生长条件,10年内增长量比对照林分高;中龄林干扰木并不是特别高大,伐除后产生的林窗也相对较小,乔木层经过间伐郁闭较快,导致灌木生长缓慢<sup>[35]</sup>,最终灌木层碳储量增长反而不如对照林分。草本层碳储量表现为经营林分(0.031 t)大于对照林分(0.028 t),表明近自然经营有利于草本层碳储量的增长,与张涛等<sup>[27]</sup>对近自然经营林下草本碳储量的研究结果一致。研究还发现近熟林草本层碳储量经营林分极显著大于对照林分( $P < 0.01$ ),这可能是由于近自然经营通过间伐降低了近熟林的林分密度,改善了林下生长环境,促进了草本植物的生长与扩散,10余年的时间内,乔木树种的幼苗幼树无法长得和成树一样高大,林层出现分化,最终导致草本植物可用的光照、林下空间和生物量相对要大于对照林分。中龄林阶段对照林分显著大于经营林分,与张涛等<sup>[27]</sup>、肖军等<sup>[33]</sup>的研究结果不一致,原因可能和灌木层相同。不同林分发展阶段马尾松人工林植被层碳储量及占比的变化规律与乔木层基本一致,这是由于乔木层在植被层中的占比大于98%,乔木层的变化基本都会体现在植被层上。

枯落物是碳从植被向土壤转移的重要枢纽,对森林生态系统的碳循环具有重要意义。本研究中枯落物碳储量表现为经营林分略大于对照林分,但无显著差异,这与Nilsen等<sup>[36]</sup>、刁娇娇等<sup>[28]</sup>得出的乔木层生物量增加导致林分枯落物量也会随之增加的结论不一致。推测主要有两个原因,一是近自然经营通过优化马尾松人工林的树种组成使得林层分化,导致林下的进光量增加、微生物活动加快促进了枯落物的分解<sup>[33,37-39]</sup>;二是林分经过长期发展已基本接近或达到郁闭,林下环境与对照林分相似,所以枯落物的输入和分解与对照林分接近,与董莉莉等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。

土壤层碳储量是森林生态系统碳储量的重要组成部分,直接关系到森林的固碳潜力。本研究中对照

林分土壤碳储量均值低于我国森林土壤碳储量的均值(7.19 t)<sup>[40]</sup>, 而经营林分幼龄林、中龄林、近熟林的土壤碳储量均值分别为7.40、8.73、8.66 t, 均高于全国平均值(7.19 t), 也高于李玉凤等<sup>[41]</sup>、肖欣等<sup>[42]</sup>对广西和江西马尾松人工林土壤碳储量的研究结果, 但低于秦晓佳等<sup>[43]</sup>关于贵州马尾松人工林土壤碳储量的研究结果。这说明森林土壤碳储量与不同大小区域范围的气候、环境条件、土壤理化性质<sup>[44]</sup>、森林经营措施、枯落物输入及植物根系周转快慢的影响<sup>[45, 46]</sup>有很大关系。本研究中土壤碳储量随林龄增大而增加, 与多数研究结论<sup>[47, 48]</sup>一致。近熟林经营林分相比对照林分土壤碳储量显著增加, 可能是近自然经营后林分进光量增加导致枯落物分解加快<sup>[49]</sup>及土壤呼吸增强<sup>[50]</sup>, 再者经营林分采伐后丰富了林分的树种组成和多样性, 增加了枯落物的种类和营养成分, 降低了枯落物分解的难度, 也反映了近自然经营对土壤碳储量的提升在近熟林阶段更明显。

马尾松人工林生态系统总碳储量均值在不同林分发展阶段均有显著增加, 主要体现在乔木层和土壤层上, 分别增加0.61、1.41 t, 原因是乔木层和土壤层碳储量占整个生态系统的90%以上, 对近自然经营的响应更明显。经营林分与对照林分相比, 生态系统碳储量层次分配规律并没有变化, 仍然表现为土壤层>乔木层>枯落物层>灌木层>草本层, 土壤层在生态系统中的占比提高1.76%, 其余各层占比均降低, 说明可通过近自然经营调整生态系统各层的碳储量分配比例, 与徐金良等<sup>[51]</sup>、孙志虎等<sup>[52]</sup>的研究结论一致。本研究中, 生态系统碳储量均值增加2 t, 乔木层碳储量占比降低, 但碳储量均值增加1.41 t, 表明本研究的时间长度下近自然经营不仅促进了森林生态系统碳储量的提升, 对大径级用材培育的效果也比较理想。物种多样性对森林的碳汇能力具有直接且积极的影响, 具备较高物种多样性的森林往往具有更高的固碳能力<sup>[53]</sup>。因此, 研究区马尾松人工林的经营改造可以通过补植适宜的阔叶树种如枫香、白栎和麻栎等, 促进树种混交和林层分化, 改善林下环境, 加速土壤养分循环, 促进植物的生长和碳累积<sup>[54]</sup>。目前对经营后短期内的碳储量变化研究较多, 缺乏经营后长期的定点监测研究<sup>[55]</sup>。本研究数据采集的时间为近自然经营12年后, 近自然经营更短时间的研究并未开展, 而近自然经营后更长时间的碳储量变化可继续监测, 并有望探索出马尾松人工林生态系统碳储量对近自然经营的响应规律, 从而为马尾松及其他

树种人工林的经营管理提供比较全面的参考。

## 4 结论

经营林分与对照林分的乔木层碳储量和土壤层碳储量占据了马尾松林生态系统碳储量的95%以上, 且经营林分与对照林分碳储量相比明显增加。近自然经营10余年后马尾松人工林生态系统各层的碳储量明显提升, 马尾松人工林生态系统不同层次碳储量的占比发生明显变化, 生态系统碳储量总体上仍然保持土壤层>乔木层>枯落物层>灌木层>草本层的分配规律。后续还可以通过补植枫香、白栎和麻栎等乡土阔叶树种增强物种多样性, 促进马尾松林生态系统林分生长和碳累积。由于调查的时间和次数有限, 近自然经营更长时间后碳储量的变化有待今后开展长期监测和更深入的研究。

## 参考文献

- [1] FAO. Global forest resources assessment 2020 [M]. Rome:FAO, 2020.
- [2] HOOVER C M, LEAK W B, KEEL B G. Benchmark carbon stocks from old-growth forests in northern New England, USA [J]. Forest Ecology and Management, 2012, 266:108-114.
- [3] DIXON R K, SOLOMON A M, BROWN S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. Science, 1994, 263(5144):185-190.
- [4] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. Science, 2008, 320(5882):1444-1449.
- [5] WANI A A, JOSHI P K, SINGH O. Estimating biomass and carbon mitigation of temperate coniferous forests using spectral modeling and field inventory data [J]. Ecological Informatics, 2015, 25:63-70.
- [6] FINKRAL A J, EVANS A M. The effects of a thinning treatment on carbon stocks in a northern Arizona ponderosa pine forest [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7):2743-2750.
- [7] GRASSI G, HOUSE J, DENTENER F, et al. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation [J]. Nature Climate Change, 2017, 7:220-226.
- [8] FAO. Production Yearbook [M]. Rome:FAO, 2011.
- [9] 丁波, 罗辉. 不同时期贵州马尾松林碳储量及固碳经济价值的变化[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(9):138-141.
- [10] MEI L, WEN X, FAN F, et al. Genetic diversity and population structure of Masson pine (*Pinus massoni-*

- ana Lamb.) superior clones in South China as revealed by EST-SSR markers [J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2021, 68(5):1987-2002.
- [11] MO R J, WANG Y Q, DONG S L, et al. Ecosystem service evaluation and multi-objective management of *Pinus massoniana* Lamb. plantations in Guangxi, China [J]. *Forests*, 2023, 14(2):213.
- [12] 崔宁洁, 刘小兵, 张丹桔, 等. 不同林龄马尾松 (*Pinus massoniana*) 人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(2):188-195.
- [13] 曾冀, 雷渊才, 贾宏炎, 等. 桂西南马尾松人工林生长对不同强度采伐的动态响应 [J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2):335-341.
- [14] 孟祥江, 何邦亮, 马正锐, 等. 我国马尾松林经营现状及近自然育林探索 [J]. *世界林业研究*, 2018, 31(3):63-67.
- [15] 王宇飞, 刘婧一. 德国近自然林经营的经验及对我国森林经营的启示 [J]. *环境保护*, 2022, 50(18):63-66.
- [16] MCROBERTS R E, WINTER S, CHIRICI G, et al. Assessing forest naturalness [J]. *Forest Science*, 2012, 58(3):294-309.
- [17] 黄凯璇, 汤新艺, 秦欢, 等. 近自然经营对杉木人工林地被物和土壤碳氮积累的影响 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(8):1556-1565.
- [18] 李婷婷, 陆元昌, 姜俊, 等. 马尾松人工林森林经营模式评价 [J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(1):164-171.
- [19] 王秋丽, 张岗岗. 森林经营模式对锐齿栎次生林林分状态的影响 [J]. *西部林业科学*, 2019, 48(2):151-158.
- [20] 王科, 谭伟, 戚玉娇. 近自然经营间伐对黔中马尾松天然次生纯林生长的初期效应 [J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(5):886-893.
- [21] 张可欣, 刘宪钊, 雷相东, 等. 马尾松人工林不同经营方式短期经济效益分析 [J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(5):43-54.
- [22] 白云星, 周运超. 马尾松人工林根系对近自然经营措施的响应 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(11):1-6.
- [23] 姜仕昆, 周运超, 谭伟, 等. 马尾松林近自然不同经营管理措施下土壤肥力 [J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(5):876-882.
- [24] 臧丽鹏, 张广奇, 何跃军, 等. 近自然经营对黔中地区马尾松灌草群落多样性及物种共存的影响 [J]. *山地农业生物学报*, 2021, 40(3):21-28.
- [25] 田卫卫, 柴宗政, 孙彩丽. 近自然经营对马尾松林不同林分发展阶段竞争关系的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(12):15-20.
- [26] 贵州省自然资源与规划厅. 贵州省单株碳汇项目方法学(编号 201712-V1)[Z]. [S. l. : s. n. ], 2017.
- [27] 张涛, 罗于洋, 王树森, 等. 近自然经营方式对不同林龄油松人工林碳储量的影响 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2):40-45.
- [28] 刁娇娇, 肖文娅, 费菲, 等. 间伐对杉木人工林生长及生态系统碳储量的短期影响 [J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2017, 37(3):134-139.
- [29] WANG H M, LIU W, WANG W J, et al. Influence of long-term thinning on the biomass carbon and soil respiration in a larch (*Larix gmelinii*) forest in North-eastern China [J]. *The Scientific World Journal*, 2013: 865645.
- [30] 董莉莉, 刘红民, 汪成成, 等. 间伐对蒙古栎次生林生态系统碳储量的短期和长期影响 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2019, 50(5):614-620.
- [31] 赵苏亚, 王瑞辉, 刘凯利, 等. 抚育间伐对不同年龄杉木人工林生长及林下植被多样性的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(12):34-43, 82.
- [32] 江萍. 不同林龄油松人工林抚育间伐效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [33] 肖军, 雷蕾, 曾立雄, 等. 不同经营模式对华北油松人工林碳储量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(11):2134-2142.
- [34] BAGDON B, HUANG C H. Carbon stocks and climate change: management implications in northern Arizona ponderosa pine forests [J]. *Forests*, 2014, 5(4):620-642.
- [35] 戎建涛, 何友均. 不同森林经营模式对丹清河林场天然次生林碳贮量的影响 [J]. *林业科学*, 2014, 50(9):26-35.
- [36] NILSEN P, STRAND L T. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand after 33 years [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3):201-208.
- [37] JOHNSON D W, CURTIS P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140(2/3):227-238.
- [38] 张晓亮, 牟长城, 张小单, 等. 透光抚育对长白山“栽针保阔”红松林土壤碳储量影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(10):22-30.
- [39] 何亚婷, 谢和生, 何友均. 不同经营模式对蒙古栎天然次生林碳储量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(2):215-223.
- [40] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展 [J]. *生态学报*, 2011, 31(19):5437-5448.
- [41] 李玉凤, 马姜明, 何静桦, 等. 广西不同林龄马尾松人工

- 林土壤碳储量动态变化[J]. 广西科学, 2020, 27(6): 638-645.
- [42] 肖欣, 王雄涛, 欧阳勋志. 马尾松人工林土壤有机碳特征及其与凋落物质量的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 105-111.
- [43] 秦晓佳, 丁贵杰. 不同林龄马尾松人工林土壤有机碳特征及其与养分的关系[J]. 浙江林业科技, 2012, 32(2): 12-17.
- [44] 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, 等. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(5): 595-608.
- [45] JANDL R, LINDNER M, VESTERDAL L, et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? [J]. *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 253-268.
- [46] ZENG Z Q, WANG S L, ZHANG C M, et al. Carbon storage in evergreen broad-leaf forests in mid-subtropical region of China at four succession stages [J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(4): 677-682.
- [47] BADALAMENTI E, BATTIPAGLIA G, GRISTINA L, et al. Carbon stock increases up to old growth forest along a secondary succession in Mediterranean Island ecosystems [J]. *PLoS One*, 2019, 14(7): e0220194.
- [48] 廖国莉, 段劫, 贾忠奎, 等. 辽东地区不同林龄长白落叶松人工林生态系统碳储量分配特征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(11): 8-13, 22.
- [49] VENANZI R, PICCHIO R, PIOVESAN G. Silvicultural and logging impact on soil characteristics in Chestnut (*Castanea sativa* Mill.) Mediterranean coppice [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 92: 82-89.
- [50] ZHANG X Z, GUAN D X, LI W B, et al. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: a meta-analysis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 36-43.
- [51] 徐金良, 毛玉明, 成向荣, 等. 间伐对杉木人工林碳储量的长期影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1898-1904.
- [52] 孙志虎, 王秀琴, 陈祥伟. 不同抚育间伐强度对落叶松人工林生态系统碳储量影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(12): 1-13.
- [53] 王义贵, 徐干君, 白明, 等. 巫山针叶林与阔叶林乔灌草结构特征及碳汇功能对比[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(10): 98-106.
- [54] 邹丰虎, 周雯, 柴宗政. 近自然经营对马尾松林优势树种生态位及种间关系的影响[J]. 西部林业科学, 2024, 53(1): 55-65.
- [55] 黄雪蔓, 尤业明, 蓝嘉川, 等. 不同间伐强度对杉木人工林碳储量及其分配的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 156-163.

## Effects of Close-to-Nature Management on Carbon Storage of *Pinus massoniana* Plantation Ecosystem

ZOU Fenghu, CHAI Zongzheng<sup>\* \* \*</sup>

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou, 550025, China)

**Abstract:** The study on the effects of close-to-nature management on carbon storage of *Pinus massoniana* plantation ecosystem can provide practical and scientific bases for carbon sequestration and sustainable management of *P. massoniana* plantation. This study took *P. massoniana* plantation in Longgang Town, Kaiyang County, Guiyang City, Guizhou Province, as the research object. The paired *t*-test was conducted to compare the carbon storage of the vegetation layer, litter layer and soil layer in the control stand and the close-to-nature management (hereinafter referred to as “management”) stand of *P. massoniana* plantation at different development stages after nearly 10 years of close-to-nature management. The results showed that: ① Close-to-nature management changed the proportion of carbon storage at different layers of the plantation ecosystem, while the overall distribution of carbon storage in the ecosystem still followed the pattern of soil layer > tree

layer>litter layer>shrub layer>herb layer. ② The carbon storage of *P. massoniana* plantation at different stand development stages was significantly higher in the management stand than in the control stand, indicating that the carbon storage of the ecosystem can be effectively improved in a relatively long period after the close-to-nature management. ③ The carbon storage in the vegetation layer was significantly higher in the management stand than in the control stand in the middle-age stage. The carbon storage in the litter layer showed no significant difference between control and management stands at the three development stages. The carbon storage in the soil layer was significantly higher in the management stand than in the control stand in the near mature stage. In conclusion, close-to-nature management has the effect of improving the carbon sequestration of *P. massoniana* plantation ecosystem. Subsequently, local broad-leaved tree species such as *Liquidambar formosana*, *Quercus fabri* and *Q. acutissima* can be replanted to enhance species diversity and promote stand growth and carbon accumulation in the *P. massoniana* ecosystem. This study provides scientific reference for the management of *P. massoniana* plantation and other plantations.

**Key words:** close-to-nature management; *Pinus massoniana* plantation; stage of stand development; carbon storage of ecosystem

责任编辑:陆媛峰



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkx@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>