

◆特邀栏目◆

广西不同林龄马尾松人工林生态系统碳储量及其分配格局*

李玉凤^{1,2,3}, 莫燕华^{3**}, 秦佳双⁴, 马姜明³

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 贺州学院, 广西贺州 542899; 3. 广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室, 广西桂林 541006; 4. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西桂林 541006)

摘要:为阐明马尾松(*Pinus massoniana*)不同林龄生态系统碳汇机制以及固碳能力的差异,本研究基于样地调查,选用空间代替时间的方法,选取立地条件大致相似、不同林龄(6、19、32、58 a)的马尾松人工林生态系统为研究对象,依据收获法和建立各器官生物量模型的方法估测生物量,采集0—60 cm土层土壤样品,测定生态系统各层次的有机碳含量,以此估算生态系统的碳储量。结果表明:不同林龄马尾松人工林林下灌木层、凋落物层和根系有机碳含量均呈增加趋势,而草本层则相反,各层次有机碳含量整体表现为凋落物层>灌木层>草本层>根系;其生态系统碳储量总体表现为增加趋势,过熟林显著提高了144.14%,其中,乔木层、凋落物层、根系和土壤层碳储量的变化规律与生态系统一致,而灌木层和草本层则相反;植被层碳储量贡献率提高,而土壤层碳储量贡献率下降,凋落物层无明显变化;年净固碳量以幼龄林和中龄林较高,表明马尾松人工林固碳能力较强,具有相对较高的生物生产力水平。近自然恢复可进一步提升不同林龄马尾松人工林的碳固持能力,提高植被层生物量和土壤碳含量、增强土壤固碳能力、优化森林结构、维持较高生产力和降低人为干扰等是提高马尾松人工林生态系统碳汇功能的重要举措。

关键词:马尾松人工林;生态系统;碳储量;分配格局;林龄

中图分类号:S718.55 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)02-0346-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20240619.015

20世纪以来,全球气候变暖已经成为人们日益关注的环境问题之一,实施碳减排、增加碳汇是减缓气候变化的关键^[1]。我国正积极应对全球气候变化的严峻挑战,全力推进“碳达峰和碳中和”(简称“双

碳”)目标,这是实现国家可持续发展的重要举措,也是我国奋进生态文明建设新征程的重点任务^[2]。森林作为陆地生态系统的主体,无疑是系统中最大的“碳库”,具有很强的固碳能力^[3],在减缓气候变化、实

收稿日期:2023-09-17

修回日期:2024-03-04

* 国家自然科学基金项目(32260387),广西高校中青年教师(科研)基础能力提升项目“广西南亚热带不同林龄马尾松人工林生态系统碳储量研究”项目(2022KY0701)和广西创新驱动发展专项课题(桂科AA17204087-7)资助。

【第一作者简介】

李玉凤(1994—),女,在读博士研究生,主要从事恢复生态学研究、生态文明建设理论与应用研究。

【**通信作者简介】

莫燕华(1993—),女,硕士,助理研究员,主要从事恢复生态学研究,E-mail:moyanhua2013@126.com。

【引用本文】

李玉凤,莫燕华,秦佳双,等.广西不同林龄马尾松人工林生态系统碳储量及其分配格局[J].广西科学,2024,31(2):346-356.

LI Y F, MO Y H, QIN J S, et al. Carbon Storage and Distribution Pattern of *Pinus massoniana* Plantations Ecosystem in Different Forest Ages in Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(2): 346-356.

现全球碳循环方面潜力巨大,因此森林碳储量估算已成为增汇减排机制研究的重要部分^[1,4]。我国人工林面积为 $7\,954.28 \times 10^4 \text{ hm}^2$,在乔木林面积中的占比为 36.45% ^[5],且随着人工林在生物量积累、 CO_2 吸收固定等方面作用的日益凸显,人工林正受到越来越多的重视^[6],因此,增加人工林碳汇被视为有效缓解全球气候变化的重要策略^[7]。

马尾松(*Pinus massoniana*)耐干旱、适应性强、蓄积量大^[8],在木材生产、碳储存和生态服务等方面发挥着重要作用^[9]。根据我国第九次森林资源清查结果,马尾松林面积 $8.043 \times 10^6 \text{ hm}^2$,蓄积量 $6.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别占全国乔木林主要优势树种面积的 4.47% ,蓄积量的 3.67% ,分别居全国乔木林主要优势树种面积和蓄积量的第 6 位^[5]。目前马尾松人工林生态系统碳储量研究主要集中在不同林龄^[6,10]、不同密度对马尾松人工林生态系统碳储量的影响^[11]、马尾松与红椎(*Castanopsis hystrix*)混交林生态系统碳储量研究^[12]等方面,关于亚热带马尾松人工林生态系统碳储量随林龄的变化规律研究相对较少。因此,本研究以广西不同林龄马尾松人工林为研究对象,基于马尾松人工林林分各层次生物量的测定,探讨其生态系统碳储量动态变化及其分配格局,以期为实现马尾松人工林的多目标经营以及加速其近自然

表 1 研究样地基本概况

Table 1 Basic overview of the study plot

林分类型 Stand type	林龄/a Forest age/a	造林密度/ (plants/hm ²) Affore-station density/ (plants/hm ²)	林分密度/ (trees/hm ²) Forest density/ (trees/hm ²)	海拔/m Altitude/m	坡向 Aspect	坡位 Slope position	平均胸径/cm Mean DBH/cm	平均树高/m Mean tree height/m	郁闭度 Canopy density
Young forest	6	2 500	1 300	313	NW	Middle	10.55	5.65	0.7
Middle-aged forest	19	2 500	1 407	378	SE	Upper-middle	12.67	10.79	0.8
Mature forest	32	2 500	598	262	N	Upper-middle	28.23	25.12	0.8
Overmature forest	58	2 500	197	258	SE	Upper	41.27	26.55	0.8

1.3 生物量的测定

通过查阅资料和实地考察,根据国家主要树种龄组划分表将马尾松人工林划分为幼龄林($\leq 10 \text{ a}$)、中龄林($11-20 \text{ a}$)、成熟林($21-50 \text{ a}$)和过熟林($\geq 51 \text{ a}$)^[15]。于 2018 年植物生长季(7-8 月),乔木选取胸径 $\geq 5 \text{ cm}$ 、灌木 $< 5 \text{ cm}$ 作为起测径阶,各等级选取 3-5 株,分别测定其胸径、树高和叶、枝、干鲜重,后于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中杀青 2 h,再调至 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒

恢复进程提供理论基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于广西横州市镇龙林场,地理坐标为 $109^\circ 08' - 109^\circ 19' \text{ E}$, $23^\circ 02' - 23^\circ 08' \text{ N}$,属南亚热带季风气候,海拔 $400-700 \text{ m}$,为低山丘陵区地貌,年平均气温为 $21.5 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量为 $1\,477.8 \text{ mm}$,年平均日照时数为 $1\,758.9 \text{ h}$ ^[13,14]。幼龄林和中龄林土壤多为黄红壤,成熟林和过熟林多为赤红壤,各林龄 $0-60 \text{ cm}$ 土层土壤有机碳含量均在 10.74 g/kg 以上^[13,14]。

1.2 样地设置与群落调查

于 2018 年选取立地条件基本一致的马尾松人工林为研究地,林分概况:幼龄林阶段进行 3 年左右的除草抚育,之后未做任何抚育处理;其他林龄在种植第 1-3 年进行除杂草保育措施、第 8-9 年进行卫生伐抚育措施之后便不再进行人为干扰,马尾松人工林进入近自然恢复状态。运用空间代替时间的方法,以幼龄林(2012 年种植)、中龄林(1999 年种植)、成熟林(1986 年种植)和过熟林(1960 年种植)为研究对象(表 1),每个样地重复设置 3 个样方,样方面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,共计调查样方 12 个^[13,14]。

重^[14],由此换算出样本木各器官的干重及总重,乔木层和灌木层具体生物量模型参见文献^[13,16]。每个标准样方分为 4 个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的小样方,在每个小样方沿对角线设置 5 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的草本样方,设置 5 个 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的凋落物样方,称量各部分鲜重,所有样品于 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重后测其含水率,以样方面积换算单位面积干物质生物量,以此测定草本层和凋落物层生物量^[13,14,17]。

根系总生物量测定采用平均木土柱取样法, 具体参见文献[18]。以0—20、20—40和40—60 cm 分层挖取根系, 依据文献[19]进行根系径级分类, 将根系分成细根(直径 ≤ 0.2 cm)、小根(0.2 cm $<$ 直径 ≤ 0.5 cm)、中根(0.5 cm $<$ 直径 ≤ 1.0 cm)和粗根(直径 > 1.0 cm)等不同径级^[14,20], 生物量测定方法同草本层和凋落物层。

1.4 有机碳含量和碳储量的测定

采用重铬酸钾氧化-外加热法^[21,22]测定灌木层、凋落物层、草本层植物和土壤层的有机碳含量, 乔木层转换系数采用国际上常用的0.5^[23,24]。植物碳储量为有机碳含量与单位面积生物量的积^[25]。本研究出现的乔木层及其林下地被物各层次的生物量、有机碳含量、碳储量、年净生产力和年净固碳量均指地上部分, 地下部分则为根系和土壤, 土壤有机碳含量和碳储量的测定方法参见文献[14]。

1.5 植被层和凋落物层年净生产力、年净固碳量的测定

以年平均净生产力(NPP)来衡量林分生产力的高低^[6], 计算公式为 $NPP = W/a$, W 为各组分生物量, a 为林分或器官年龄, 马尾松人工林各组分年净固碳量为各组分年平均净生产力与相应组分碳含量的积, 具体参见文献[6]。

1.6 数据处理

采用 Excel 2010 软件对数据进行初步整理计

表2 不同林龄马尾松人工林林下地被物有机碳含量

Table 2 Organic carbon content of understory ground cover in *P. massoniana* plantations with different forest ages Unit:g/kg

林分类型 Stand type	灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer	凋落物层 Litter layer
	叶 Foliage	枝 Branch	干 Trunk	平均值 Average value		
Young forest	360.00 \pm 37.17b	346.67 \pm 35.55b	385.33 \pm 34.02b	364.00 \pm 12.72c	395.85 \pm 19.53b	412.31 \pm 87.17a
Middle-aged forest	421.33 \pm 53.27ab	417.33 \pm 47.72a	420.00 \pm 46.36ab	419.56 \pm 16.56b	390.37 \pm 17.01b	425.24 \pm 26.24a
Mature forest	436.00 \pm 16.65a	450.67 \pm 20.00a	405.33 \pm 10.07ab	430.67 \pm 7.06b	425.11 \pm 4.67a	428.36 \pm 23.16a
Overmature forest	485.33 \pm 19.73a	422.67 \pm 20.00a	461.33 \pm 16.65a	456.44 \pm 10.86a	381.41 \pm 11.94b	414.04 \pm 45.79a

Note: different lowercase letters indicate significant differences among different stands at the same level ($P < 0.05$).

2.1.2 根系有机碳含量

由表3可知, 马尾松人工林随着近自然恢复的进行, 不同径级和土层根系分布规律存在一定差异。细根平均有机碳含量呈下降趋势, 粗根为先上升后下降趋势; 小根呈先下降后增加再下降趋势, 中根呈先增加后下降再增加的趋势。细根和小根平均有机碳含量均以幼龄林最高, 细根幼龄林比中龄林、成熟林和过熟林分别提高2.90%、4.77%、9.86%, 小根幼龄

算, 采用 SPSS 19.0 软件分析数据, 采用 Pearson 法分析各层次碳储量与各因子间的相关性, 采用 Sigmaplot 12.5 软件作图。运用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同林龄马尾松人工林生态系统各层次(器官)碳含量、碳储量、年净生产力和年净固碳量等进行差异性分析。图表中的数据均用平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 生态系统各层次有机碳含量

2.1.1 林下地被物有机碳含量

由表2可知, 马尾松人工林随着近自然恢复的进行, 其灌木层和凋落物层有机碳含量整体上均呈增加的趋势, 而草本层则呈先下降后增加再下降的趋势。马尾松人工林灌木层有机碳含量的平均值以过熟林最高, 达456.44 g/kg, 比幼龄林、中龄林和成熟林分别显著提高25.40%、8.79%和5.98% ($P < 0.05$)。马尾松人工林草本层和凋落物层有机碳含量均以成熟林较高, 分别达425.11和428.36 g/kg, 草本层成熟林比幼龄林、中龄林和过熟林分别提高7.39%、8.90%和11.46%, 凋落物层成熟林比幼龄林、中龄林和过熟林分别提高3.89%、0.73%和3.46%。中龄林阶段各组分有机碳含量表现为凋落物层 $>$ 灌木层 $>$ 草本层。以上结果表明生态系统各层次有机碳含量随近自然恢复而变化。

林比中龄林、成熟林和过熟林分别提高7.74%、0.26%、9.53%。中根和粗根平均有机碳含量均以中龄林最高, 中根中龄林比幼龄林、成熟林和过熟林分别提高5.43%、9.26%和6.03%, 粗根中龄林比幼龄林、成熟林和过熟林分别提高25.12%、0.99%和1.47%。各径级不同土层根系有机碳含量整体表现为随着土层深度增加而下降。

表 3 不同林龄马尾松人工林各径级根系有机碳含量

Table 3 Organic carbon content of roots in different diameter classes of *P. massoniana* plantations with different forest ages

Unit:g/kg

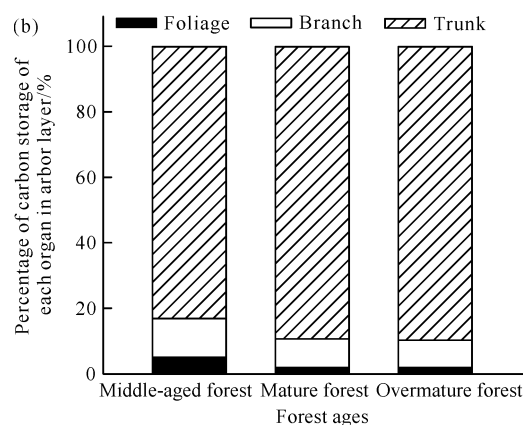
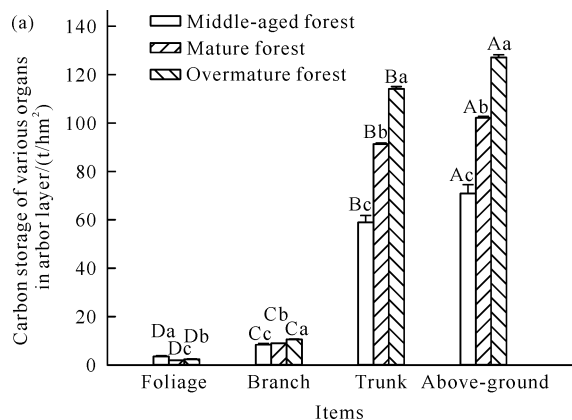
林分类型 Stand type	细根 Fine root				小根 Small root			
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-60 cm
Young forest	324.70± 5.47a	330.00± 28.73a	312.04± 67.67a	322.25± 23.26a	334.67± 11.39b	399.11± 14.33a	381.33± 14.42a	371.70± 4.45a
Middle-aged forest	320.72± 18.98a	312.83± 12.68a	305.94± 4.39a	313.17± 10.88a	343.33± 19.08b	346.11± 79.72a	345.56± 27.40ab	345.00± 11.56b
Mature forest	310.22± 59.95a	336.56± 25.94a	276.00± 15.61a	307.59± 13.14a	340.22± 10.21b	380.81± 16.12a	391.11± 62.36a	370.72± 17.81a
Overmature forest	352.15± 19.54a	243.00± 16.70b	284.83± 17.53a	293.33± 5.96a	389.22± 11.64a	327.65± 56.31a	301.17± 3.11b	339.35± 14.67b
林分类型 Stand type	中根 Middle root				粗根 Coarse root			
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-60 cm
Young forest	350.67± 14.74b	369.33± 63.54ab	357.33± 0.00a	359.11± 16.36ab	303.00± 13.08b	0.00± 0.00	0.00± 0.00	303.00± 13.08b
Middle-aged forest	318.53± 7.02b	438.67± 38.16a	0.00± 0.00	378.60± 17.62a	379.11± 10.86a	0.00± 0.00	0.00± 0.00	379.11± 10.86a
Mature forest	356.00± 37.47ab	393.33± 6.11ab	290.17± 23.26b	346.50± 5.09b	408.00± 24.26a	359.56± 20.71a	358.67± 16.65a	375.41± 3.98a
Overmature forest	392.00± 3.06a	326.28± 38.72b	352.89± 37.39a	357.06± 2.36ab	404.00± 13.32a	365.33± 18.67a	351.56± 33.90a	373.63± 10.43a

Note: different lowercase letters indicate significant difference between different stands of the same diameter level and the same soil layer ($P < 0.05$).

2.2 生态系统各组分碳储量及分配特征

2.2.1 乔木层碳储量

由图 1 可知,马尾松人工林随着近自然恢复的进行,乔木层枝、干和地上部分碳储量均表现为增加趋势,叶为先减少后增加趋势。乔木层碳储量以过熟林最高,达 127.09 t/hm^2 , 分别比中龄林 (70.86 t/hm^2) 和成熟林 (102.16 t/hm^2) 显著提高 79.35% 和 24.40% ($P < 0.05$)。不同林龄乔木层各器官碳储量分配为干 > 枝 > 叶,近自然恢复过程中碳储量在干和枝的分配增加,而在叶的分配减少。树干碳储量在乔木层中的占比为 83.11%—89.76%,表明树干为马尾松人工林碳储量的主体部分。



Different lowercase letters indicate significant difference between different stands of the same organ ($P < 0.05$), different capital letters indicate significant differences among different organs in the same stand ($P < 0.05$). In the figure, (a) and (b) respectively represent the carbon storage and percentage of each organ in the tree layer of *P. massoniana* plantations in different stands.

图 1 不同林龄马尾松人工林乔木层各器官碳储量及其分配

Fig. 1 Carbon storage and allocation of various organs in the tree layer of *P. massoniana* plantations with different forest ages

2.2.2 林下地被物碳储量及其分配

由表 4 可知,马尾松人工林随着近自然恢复的进

行,其灌木层碳储量整体呈先减少后增加的趋势,草本层为先减少后增加再减少趋势,而凋落物层则呈先增加后减少的趋势。灌木层和草本层碳储量基本上以幼龄林显著高于其他林龄,灌木层幼龄林分别是中龄林、成熟林、过熟林的 8.93、5.51、1.88 倍,草本层幼龄林分别是中龄林、成熟林、过熟林的 91.60、12.72、114.50 倍。凋落物层碳储量以中龄林最高,

表 4 不同林龄马尾松人工林林下地被物碳储量

林分类型 Stand type	灌木层 Shrub layer				草本层 Herb layer	凋落物层 Litter layer
	叶 Foliage	枝 Branch	干 Trunk	地上 Above-ground		
Young forest	0.95±0.10a	1.47±0.15a	9.37±0.82a	11.79±0.91a	4.58±0.44a	3.10±1.57a
Middle-aged forest	0.27±0.03b	0.22±0.03b	0.83±0.29c	1.32±0.29c	0.05±0.04b	5.20±1.80a
Mature forest	0.38±0.23b	0.47±0.28b	1.28±0.77c	2.14±1.29c	0.36±0.43b	4.93±1.59a
Overmature forest	1.04±0.16a	1.37±0.08a	3.86±1.01b	6.28±0.95b	0.04±0.01b	4.64±0.69a

Note: different lowercase letters indicate significant differences between different stands at the same level and in the same organ ($P < 0.05$).

2.2.3 根系碳储量

马尾松人工林随着近自然恢复的进行,其根系总碳储量呈增加趋势,各土层根系碳储量与总碳储量变化规律一致。根系总碳储量以过熟林最高,分别比幼龄林、中龄林和成熟林高 176.06%、64.71% 和 39.50%。根系碳储量随土层深度的增加而下降,马尾松人工林根系碳储量(0—60 cm)以 0—20 cm 土层最高,达 7.65 t/hm²,分别比 20—40 和 40—60 cm 土层高 325.00% 和 608.33%,根系分布主要集中在 0—20 cm 土层,在总碳储量中的占比为 72.65%,且

表 5 不同林龄马尾松人工林各径级根系碳储量

林分类型 Stand type	径级 Diameter class	土壤层次 Soil layer			总碳储量 Total carbon storage
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	
Young forest	Fine root	0.47±0.15Ba (44.76%)	0.15±0.07Ba (57.69%)	0.07±0.06ABb (63.64%)	0.69±0.27Ba (48.59%)
	Small root	0.25±0.16BCa (23.81%)	0.07±0.03BCa (26.92%)	0.04±0.03Aba (36.36%)	0.36±0.14BCa (25.35%)
	Middle root	0.32±0.26BCa (30.48%)	0.04±0.07Ca (15.38%)	0.00±0.00Bb (0.00%)	0.36±0.32BCa (25.35%)
	Coarse root	0.01±0.02Cb (0.95%)	0.00±0.00Ca (0.00%)	0.00±0.00Ba (0.00%)	0.01±0.02Cb (0.70%)
	Total	1.05±0.18Aa (100.00%)	0.26±0.04Aa (100.00%)	0.11±0.08Aa (100.00%)	1.42±0.30Ab (100.00%)
Middle-aged forest	Fine root	0.37±0.11Ba (18.78%)	0.10±0.06Ba (35.71%)	0.10±0.03Aab (76.92%)	0.57±0.04Ba (23.95%)

分别比幼龄林、成熟林以及过熟林高 67.74%、5.48% 和 12.07%。马尾松人工林幼龄林、中龄林、成熟林、过熟林的林下地被物碳储量分别为 19.47、6.57、7.43 和 10.96 t/hm²,幼龄林和过熟林均以灌木层碳储量最高,中龄林和成熟林均以凋落物层碳储量最高。

在过熟林中达最大值(表 5)。

马尾松人工林随着近自然恢复的进行,不同径级根系碳储量分布规律具有一定差异。随着径级增加至粗根,中龄林、成熟林和过熟林各径级根系碳储量均表现为先下降后增加趋势,而幼龄林则为下降趋势,其中最大值和最小值分别出现在过熟林粗根和幼龄林粗根。就碳储量分配率差异而言,幼龄林有利于细根、小根和中根的碳储量分配,过熟林有利于粗根的碳储量分配。

续表

Continued table

林分类型 Stand type	径级 Diameter class	土壤层次 Soil layer			总碳储量 Total carbon storage
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	
Mature forest	Small root	0.15±0.09Ba (7.61%)	0.09±0.03Ba (32.14%)	0.03±0.02Ba (23.08%)	0.28±0.13Ba (11.76%)
	Middle root	0.40±0.11Ba (20.30%)	0.09±0.09Ba (32.14%)	0.00±0.00Bb (0.00%)	0.48±0.17Ba (20.17%)
	Coarse root	1.05±0.92ABab (53.30%)	0.00±0.00Ba (0.00%)	0.00±0.00Ba (0.00%)	1.05±0.92Bab (44.12%)
	Total	1.97±0.94Aa (100.00%)	0.28±0.14Aa (100.00%)	0.13±0.03Aa (100.00%)	2.38±0.98Aab (100.00%)
	Fine root	0.37±0.05Aa (19.27%)	0.17±0.08Ba (36.96%)	0.05±0.03Ab (11.63%)	0.60±0.05Ba (21.35%)
	Small root	0.18±0.05Aa (9.38%)	0.11±0.06Ba (23.91%)	0.07±0.08Aa (16.28%)	0.36±0.15Ba (12.81%)
	Middle root	0.40±0.49Aa (20.83%)	0.15±0.14Ba (32.61%)	0.04±0.04Ab (9.30%)	0.58±0.47Ba (20.64%)
Overmature forest	Coarse root	0.97±1.13Aab (50.52%)	0.03±0.04Ba (6.52%)	0.27±0.30Aa (62.79%)	1.27±1.37ABab (45.20%)
	Total	1.92±1.61Aa (100.00%)	0.46±0.21Aa (100.00%)	0.43±0.43Aa (100.00%)	2.81±2.03Aab (100.00%)
	Fine root	0.45±0.12Ca (16.61%)	0.16±0.06Aa (20.00%)	0.22±0.12Aba (53.66%)	0.83±0.05Ca (21.17%)
	Small root	0.19±0.10Ca (7.01%)	0.11±0.04Aa (13.75%)	0.08±0.10Ba (19.51%)	0.38±0.05Ca (9.69%)
	Middle root	0.13±0.03Ca (4.80%)	0.10±0.13Aa (12.50%)	0.11±0.03Ba (26.83%)	0.34±0.10Ca (8.67%)
	Coarse root	1.94±0.32Ba (71.59%)	0.43±0.57Aa (53.75%)	0.00±0.00Ba (0.00%)	2.37±0.53Ba (60.46%)
	Total	2.71±0.16Aa (100.00%)	0.80±0.58Aa (100.00%)	0.41±0.25Aa (100.00%)	3.92±0.46Aa (100.00%)

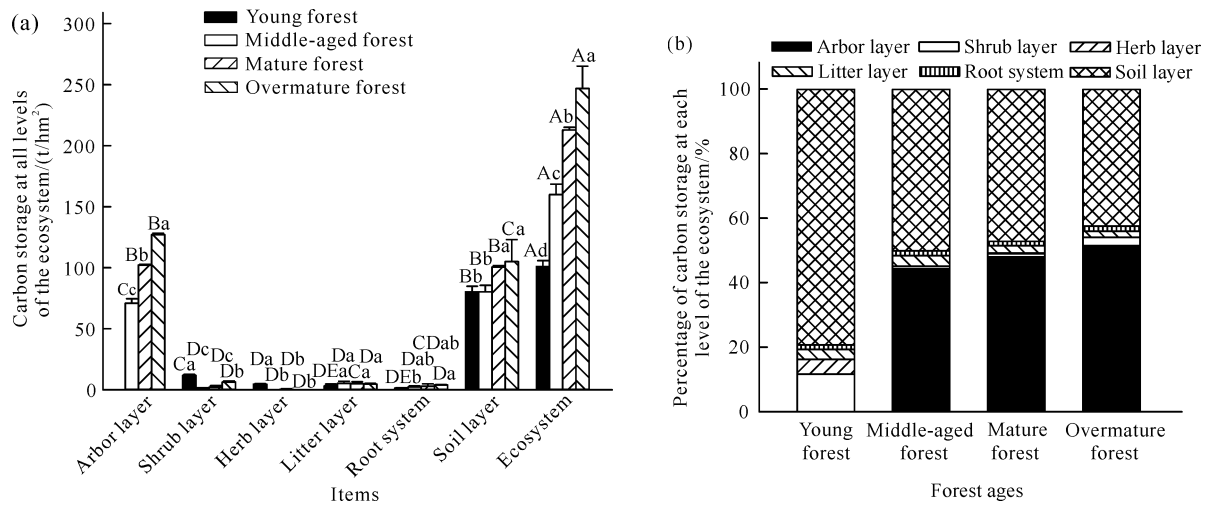
Note: different lowercase letters indicate significant differences among different stands of the same diameter class in the same soil layer ($P < 0.05$), different capital letters indicate significant differences among different diameter classes in the same soil layer of the same stand ($P < 0.05$). The data in parentheses represents the percentage of root carbon storage of different diameter classes and soil layers in the same stand, that is, the distribution rate.

2.3 近自然恢复过程中生态系统碳储量动态变化

由图 2(a)可知,马尾松人工林随着近自然恢复的进行,其生态系统碳储量总体表现为增加趋势。其中,乔木层、凋落物层、根系和土壤层碳储量的变化规律与生态系统一致,而灌木层和草本层则相反。生态系统碳储量以过熟林最高,达 246.90 t/hm²,分别比幼龄林(101.13 t/hm²)、中龄林(160.03 t/hm²)和成熟林(212.92 t/hm²)显著提高 144.14%、54.28%和 15.96% ($P < 0.05$)。表明马尾松人工林随着近自然恢复的进行,其生态系统碳汇功能明显提高。

由图 2(b)可知,乔木层和土壤层之和在生态系统中的占比达 93.97%—95.19% (幼龄林除外),其他层次仅为 4.81%—20.66%,可见,乔木层和土壤

层为主要碳库。马尾松人工林随着近自然恢复的进行,其植被层碳储量贡献率增加,幼龄林、中龄林、成熟林、过熟林分别为 17.59%、46.60%、50.47%和 55.63%,而土壤层碳储量贡献率下降,分别为 79.33%、50.15%、47.21%和 42.49%。凋落物层碳储量在生态系统中的分配虽少,仅为 1.88%—3.25%,但其为生态系统中土壤-植物组分碳循环的联结库,对人工林生态系统碳循环具有重大作用。就碳储量分配率差异而言,幼龄林有利于灌木层、草本层和土壤层的碳储量分配,中龄林有利于凋落物层的碳储量分配,过熟林有利于乔木层、根系的碳储量分配。



Different lowercase letters indicate significant difference between different stands at the same level of ecosystem ($P < 0.05$). Different capital letters indicate significant difference among different levels of the same stand ecosystem ($P < 0.05$). In the figure (a) and (b) respectively represent the carbon storage and its percentage of each layer of the *P. massoniana* plantations ecosystem of different stands.

图2 不同林龄马尾松人工林生态系统各层次碳储量及其百分比

Fig. 2 Carbon storage and its percentage in different layers of *P. massoniana* plantations ecosystem with different forest ages

2.4 近自然恢复过程中马尾松人工林固碳能力

由表6可知,马尾松人工林随着近自然恢复的进行,其总年净生产力以幼龄林和过熟林较高,分别比中龄林显著提高32.90%和1.44% ($P < 0.05$),分别比成熟林显著提高48.53%和13.37% ($P < 0.05$)。马尾松人工林总年净固碳量以幼龄林和中龄林较高,分别比成熟林显著提高24.88%和13.38% ($P < 0.05$),分别比过熟林显著提高10.63%和0.44%

($P < 0.05$)。其中,乔木层年净生产力和年净固碳量均以中龄林较高,分别比成熟林显著提高34.49%和34.61%,分别比过熟林显著提高62.16%和62.07% ($P < 0.05$)。乔木层在马尾松人工林总年净生产力和总年净固碳量中的占比分别为35.33%—58.12%和38.54%—62.18%,表明不同恢复阶段年净固碳量差异主要由乔木层年净固碳量差异引起,乔木层固碳能力较强。

表6 不同林龄马尾松人工林各组分子年净生产力和年净固碳量

Table 6 Annual net productivity and annual net carbon sequestration of each component of *P. massoniana* plantations with different forest ages Unit: t/(hm²·a)

林分类型 Stand type	项目 Item	乔木层 Arbor layer			
		叶 Foliage	枝 Branch	干 Trunk	地上 Above-ground
Young forest	Annual net productivity	—	—	—	—
	Annual carbon storage	—	—	—	—
Middle-aged forest	Annual net productivity	4.19±0.34a (21.61%)	0.88±0.05a (4.54%)	6.20±0.31a (31.97%)	11.27±0.69a (58.12%)
	Annual carbon storage	2.10±0.17a (23.15%)	0.44±0.03a (4.85%)	3.10±0.15a (34.18%)	5.64±0.35a (62.18%)
Mature forest	Annual net productivity	2.11±0.05c (12.16%)	0.56±0.01b (3.23%)	5.71±0.03b (32.91%)	8.38±0.09b (48.30%)
	Annual carbon storage	1.06±0.03c (13.25%)	0.28±0.00b (3.50%)	2.85±0.02b (35.63%)	4.19±0.04b (52.38%)
Overmature forest	Annual net productivity	2.65±0.07b (13.47%)	0.37±0.00c (1.88%)	3.93±0.03c (19.98%)	6.95±0.10c (35.33%)
	Annual carbon storage	1.33±0.03b (14.73%)	0.18±0.00 (1.99%)	1.97±0.02c (21.82%)	3.48±0.05c (38.54%)

续表

Continued table

林分类型 Stand type	项目 Item	灌木层 Shrub layer			
		叶 Foliage	枝 Branch	干 Trunk	地上 Above-ground
Young forest	Annual net productivity	1.32±0.01a (5.12%)	2.12±0.00a (8.23%)	12.16±0.00a (47.19%)	15.60±0.01a (60.54%)
	Annual carbon storage	0.48±0.05a (4.80%)	0.74±0.08a (7.41%)	4.69±0.41a (46.95%)	5.91±0.46a (59.16%)
Middle-aged forest	Annual net productivity	0.32±0.02b (1.65%)	0.27±0.06c (1.39%)	0.97±0.26c (5.01%)	1.56±0.32c (8.05%)
	Annual carbon storage	0.13±0.01b (1.43%)	0.11±0.01b (1.21%)	0.42±0.15c (4.63%)	0.66±0.15c (7.28%)
Mature forest	Annual net productivity	0.45±0.28b (2.59%)	0.53±0.32c (3.06%)	1.57±0.92c (9.05%)	2.55±1.53c (14.70%)
	Annual carbon storage	0.19±0.12b (2.38%)	0.24±0.14b (3.00%)	0.64±0.39c (8.00%)	1.07±0.64c (13.38%)
Overmature forest	Annual net productivity	1.07±0.12a (5.44%)	1.63±0.13b (8.29%)	4.17±1.00b (21.20%)	6.87±1.03b (34.93%)
	Annual carbon storage	0.52±0.08a (5.76%)	0.69±0.04a (7.64%)	1.93±0.50b (21.37%)	3.14±0.48b (34.77%)
林分类型 Stand type	项目 Item	草本层 Herb layer	凋落物层 Litter layer	根系 Root system	总计 Total
Young forest	Annual net productivity	5.79±0.58a (22.47%)	3.68±1.46b (14.28%)	0.70±0.15a (2.72%)	25.77±0.73a (100.00%)
	Annual carbon storage	2.29±0.22a (22.92%)	1.55±0.79a (15.52%)	0.24±0.05a (2.40%)	9.99±0.21a (100.00%)
Middle-aged forest	Annual net productivity	0.06±0.05b (0.31%)	6.09±1.96a (31.41%)	0.41±0.17b (2.11%)	19.39±0.88bc (100.00%)
	Annual carbon storage	0.03±0.02b (0.33%)	2.60±0.90a (28.67%)	0.14±0.06b (1.54%)	9.07±0.41a (100.00%)
Mature forest	Annual net productivity	0.43±0.51b (2.48%)	5.75±1.80ab (33.14%)	0.24±0.17b (1.38%)	17.35±1.83c (100.00%)
	Annual carbon storage	0.18±0.21b (2.25%)	2.47±0.80a (30.88%)	0.09±0.06b (1.13%)	8.00±0.77b (100.00%)
Overmature forest	Annual net productivity	0.05±0.01b (0.25%)	5.62±0.69ab (28.57%)	0.18±0.02b (0.92%)	19.67±1.01b (100.00%)
	Annual carbon storage	0.02±0.00b (0.22%)	2.32±0.35a (25.69%)	0.07±0.01b (0.78%)	9.03±0.46a (100.00%)

Note: different lowercase letters indicate significant difference among different stands ($P < 0.05$). The data in brackets are the percentage of the annual net productivity and annual net carbon sequestration of different levels and organs in the same stand, that is, the distribution rate.

3 讨论

3.1 不同林龄对各层次碳含量的影响

马尾松人工林随着近自然恢复的进行,灌木层各器官有机碳含量的排序存在一定差异,其中马尾松幼龄林优先投资于获取养分的部位,即树干和树叶^[26]。本研究林龄为 19 a 的马尾松人工林灌木层有机碳含量为 419.56 g/kg,低于贵州林龄为 12 a 的马尾松人工林灌木层有机碳含量(471.14 g/kg)^[27],凋落物层有机碳含量(425.24 g/kg)与广西沙塘林场马尾松人

工林中龄林(429.10 g/kg)^[10]较为接近,高于长沙市林龄为 13 a 的马尾松人工林(393.92 g/kg)^[28]。马尾松生长期人工林凋落物层有机碳含量随林龄增加而升高,可能与林内落叶不断积累有关^[26]。林龄为 32 a 的马尾松人工林林下植被层有机碳含量为 427.89 g/kg,高于广西沙塘林场马尾松人工林成熟林林下植被有机碳含量(425.40 g/kg)^[10]。以上研究表明生长区域及发育阶段的差异均会对马尾松人工林各层次有机碳含量产生一定影响。笔者前期研究表明,随着林龄增加,马尾松人工林生态系统中土

壤有机碳含量变化规律表现为增加趋势^[14]。

不同林龄马尾松人工林下灌木层有机碳含量整体上高于草本层,可能与植物个体高度相关,植被层碳含量与林下植被种类以及林下环境条件存在密切关系^[29],且灌木层通常具有更快的生长速度和更大的生物量,这可能导致其有机碳含量相对较高。由于灌木层植物在生长过程中积累更多的有机物质,因此其有机碳含量可能会高于草本层^[30]。马尾松人工林幼龄林和中龄林林下地被物有机碳含量均以凋落物层较高,这与胡芳等^[31]的研究结果一致,可能是凋落物在分解过程中碳释放的数量和速率差异所致^[25]。

3.2 不同林龄对生态系统碳储量的影响

Justine 等^[32]研究表明,森林组成、密度、林龄结构以及经营活动等均会对生态系统碳储量产生重要影响。笔者前期研究表明,随着林龄增加,马尾松人工林生态系统中土壤碳储量变化规律表现为增加趋势^[14]。同样,随着林龄的增加,马尾松人工林生态系统碳储量也呈增加趋势,这与已有研究结果一致^[22,31],究其原因主要是乔木层生物量和土壤有机碳含量共同作用的结果。具体而言,树木生长过程中生物量不断累积,树木通过光合作用吸收的二氧化碳转化为糖类有机物质,最终导致碳储量增加。同时,林地土壤中的碳主要来源于枯落物的分解和根系的死亡与分解,碳在土壤中不断积累,进而增加土壤碳储量。此外,不同地区和不同管理方式的马尾松人工林对碳储量增长趋势的影响也会有所不同。

马尾松人工林随着近自然恢复的进行,其植被层平均碳储量为 84.29 t/hm^2 ,是我国森林植被平均碳储量(57.07 t/hm^2)^[33]的 1.48 倍,是我国亚热带针叶林平均碳储量(63.70 t/hm^2)的 1.32 倍^[34],主要归因于其乔木层具有较高的生物量,乔木碳库为马尾松人工林地上碳库的重要部分,林下植被层对于维持地力、保持水土等方面具有关键作用,因此需加强林下植被的保护以提升马尾松人工林生态系统的碳汇^[29]。不同林龄马尾松人工林生态系统碳储量的平均值为 180.25 t/hm^2 ,低于我国碳储量的平均值(258.83 t/hm^2)^[33],可能是由于马尾松人工林土壤有机碳储量(91.48 t/hm^2)低于我国森林土壤有机碳储量的平均值(107.80 t/hm^2)^[35],也可能与林分密度有很大关系,具体原因尚需进一步研究。

3.3 不同林龄对植被年净生产力和年净固碳量的影响

马尾松人工林随着近自然恢复的进行,年净固碳

量作为表征森林碳汇功能强弱的重要指标^[36],其总的变化规律与已有研究结果^[6]相似。本研究不同林龄阶段马尾松人工林的平均净固碳量为 $9.02 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,高于我国净固碳量的平均值 $[5.54 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ^[33,37];林龄为 6、19 和 58 a 的马尾松人工林总净固碳量分别为 9.99 、 9.07 和 $9.03 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,均分别高于桂东南林龄为 5、15、60 a 的马尾松人工林总净固碳量[分别为 8.71 、 6.88 和 $5.42 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ^[6];林龄为 32 a 的马尾松人工林总净固碳量 $[8.00 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 低于桂东南马尾松人工林林龄为 32 a 的总净固碳量 $[10.37 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ^[6],表明不同林龄马尾松人工林整体固碳能力较高,有利于大径材培育和多目标人工林经营。不同林龄马尾松人工林乔木层年净固碳量差异导致总年净固碳量差异较大,可能与乔木层生物量增长有关^[38]。幼龄林和中龄林总年净固碳量较高,这可能是由于在幼龄林和中龄林阶段,马尾松人工林植被生长迅速,生物量积累较快,此时植被对二氧化碳的吸收和固定能力强,有机物质积累较多^[30,39]。幼龄林和过熟林总年净生产力较高,可能是由于在幼龄林阶段植被生长旺盛,光合作用效率高;而过熟林可能由于林分结构优化、生物量和碳储量持续积累,导致其总年净生产力相对较高。

4 结论

马尾松人工林随着近自然恢复的进行,其生态系统碳储量整体呈增加趋势,其中植被层碳储量贡献率从幼龄林的 17.59% 提高到过熟林的 55.63%,0—60 cm 土层碳储量贡献率从 79.33% 降至 42.49%,表明不同林龄马尾松人工林整体固碳能力较强,具有较强的碳汇功能,对促进人工林碳循环具有重要作用。通过采取合理的经营措施促进马尾松人工林近自然恢复,提高物种多样性,加大人工林中过熟林的比例,优化森林结构,加大对植被层的保护,提升植被层生物量以及土壤碳含量以增加人工林生态系统碳储量,维持较高生产力和降低人为干扰是提高马尾松人工林生态系统碳汇功能的重要举措。今后的研究将致力于林龄结构的改善和森林经营管理措施的优化,为提升马尾松人工林生态系统碳汇功能奠定基础。

参考文献

- [1] 魏红,满秀玲.中国寒温带不同林龄白桦林碳储量及分配特征[J].植物生态学报,2019,43(10):843-852.

- [2] 胡广文,顾一帆,吴玉锋,等. 中国实现碳中和:降碳风险的识别与应对[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2024,24(1):135-146.
- [3] HUANG Z, CUI Z, LIU Y, et al. Carbon accumulation by *Pinus sylvestris* forest plantations after different periods of afforestation in a semiarid sandy ecosystem [J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(6): 2094-2104.
- [4] CHIA E L, BITCHICK A C B B, HUBERT D, et al. Assessing "results-based" payment determinants in forest carbon emission reduction initiatives: case of forest carbon projects in Cameroon [J]. Journal of Sustainable Development, 2021, 14(3): 45-57.
- [5] 孙长山. 探索中国森林资源发展现状[J]. 林业勘查设计, 2020, 49(4): 22-24, 42.
- [6] 徐慧芳,宋同清,黄国勤,等. 广西不同林龄马尾松碳储量及分配格局[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(1): 195-203.
- [7] LAL R. Forest soils and carbon sequestration [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220(1/2/3): 242-258.
- [8] 杨章旗,冯源恒,谭健晖,等. 广西马尾松高世代育种策略研究[J]. 广西林业科学, 2018, 47(3): 251-256.
- [9] BAI T D, CHEN M X, YE J P, et al. Similar genetic diversity but increased differentiation revealed among a 58-year-old *Pinus massoniana* seed-tree stand and its progenies generated at different ages [J]. European Journal of Forest Research, 2021, 140(3): 649-656.
- [10] 陶玉华,冯金朝,曹书阁,等. 广西沙塘林场马尾松和杉木人工林的碳储量研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 38-44.
- [11] 张国庆,黄从德,郭恒,等. 不同密度马尾松人工林生态系统碳储量空间分布格局[J]. 浙江林业科技, 2007, 27(6): 10-14.
- [12] 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.
- [13] 李玉凤,秦佳双,马姜明,等. 亚热带马尾松人工林地上生物量模型构建及分配特征[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(4): 170-180.
- [14] 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.
- [15] 国家林业局. 主要树种龄级与龄组划分:LY/T 2908—2017 [S]. 北京:中国标准出版社, 2017: 10.
- [16] 谢宗强,王杨,唐志尧,等. 中国常见灌木生物量模型手册[M]. 北京:科学出版社, 2018.
- [17] 马姜明,梁士楚,梁月明,等. 桂林岩溶石山主要灌丛类型地上生物量及分配特征[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2009, 27(4): 95-98.
- [18] 马姜明,刘世荣,刘兴良. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中根系生物量研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2010, 28(3): 56-60.
- [19] 高祥,丁贵杰,翟帅帅,等. 不同林分密度马尾松人工林根系生物量及空间分布研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(6): 71-75.
- [20] 宋尊荣,秦佳双,李明金,等. 亚热带马尾松人工林根系生物量分布格局[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(1): 149-156.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [22] 兰斯安,杜虎,曾馥平,等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1125-1134.
- [23] ZHU J X, HU X Y, YAO H, et al. A significant carbon sink in temperate forests in Beijing: based on 20-year field measurements in three stands [J]. Science China Life Sciences, 2015, 58(11): 1135-1141.
- [24] 周序力,蔡琼,熊心雨,等. 贵州月亮山不同演替阶段亮叶水青冈林碳储量及其分配格局[J]. 植物生态学报, 2018, 42(7): 703-712.
- [25] 明安刚,贾宏炎,田祖为,等. 不同林龄格木人工林碳储量及其分配特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 940-946.
- [26] 洪滔,何晨阳,黄贝佳,等. 不同林龄千年桐人工林的碳含量和碳储量及碳库分配格局[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(1): 9-16.
- [27] 丁波,丁贵杰,张耀荣. 密度调控对马尾松人工林生态系统碳储量的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 197-203.
- [28] 巫涛,彭重华,田大伦,等. 长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4034-4042.
- [29] 康冰,刘世荣,张广军,等. 广西大青山亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1320-1329.
- [30] 张治军,张小全,王彦辉,等. 重庆铁山坪马尾松林生态系统碳储量及其分配特征[J]. 林业科学, 2009, 45(5): 49-53.
- [31] 胡芳,杜虎,曾馥平,等. 广西不同林龄喀斯特森林生态系统碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 721-729.
- [32] JUSTINE M F, YANG W Q, WU F Z, et al. Dynamics of biomass and carbon sequestration across a chronosequence of masson pine plantations [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(3): 578-591.
- [33] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
- [34] 明安刚,郑路,麻静,等. 铁力木人工林生物量与碳储量

- 及其分配特征[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(2): 32-39.
- [35] 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.
- [36] 谢敏洋, 何斌, 戴军, 等. 桂西北秃杉人工林不同年龄阶段的固碳功能[J]. 林业科学研究, 2020, 33(5): 106-113.
- [37] 卢开成, 张明慧, 李春宁, 等. 桂西南尾巨桉中龄林生态系统碳储量及其分布格局[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(12): 171-173.
- [38] 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.
- [39] 韩畅, 宋敏, 杜虎, 等. 广西不同林龄杉木、马尾松人工林根系生物量及碳储量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2282-2289.

Carbon Storage and Distribution Pattern of *Pinus massoniana* Plantations Ecosystem in Different Forest Ages in Guangxi

LI Yufeng^{1,2,3}, MO Yanhua^{3**}, QIN Jiashuang⁴, MA Jiangming³

(1. Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China; 2. Hezhou University, Hezhou, Guangxi, 542899, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Landscape Resources Conservation and Sustainable Utilization in Lijiang River Basin, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541006, China; 4. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi, 541006, China)

Abstract: In order to clarify the differences in carbon sink mechanism and carbon sequestration capacity of different forest ages of *Pinus massoniana*, based on the sample plot survey, this study selected the method of space instead of time, and selected the *P. massoniana* plantation ecosystem with roughly similar site conditions and different forest ages (6, 19, 32, 58 a) as the research object. The biomass was estimated according to the harvest method and the method of establishing the biomass model of each organ. The soil samples of 0–60 cm soil layer were collected to determine the organic carbon content of each layer of the ecosystem, so as to estimate the carbon storage of the ecosystem. The results showed that the contents of organic carbon in the shrub layer, litter layer and root system of *P. massoniana* plantations at different stand ages showed an increasing trend, while the herb layer showed the opposite trend. The overall organic carbon content of each layer showed litter layer > shrub layer > herb layer > root system. The carbon storage of the ecosystem showed an increasing trend, and the over-mature forest increased significantly by 144.14%. Among them, the variation of carbon storage in tree layer, litter layer, root system and soil layer was consistent with that of ecosystem, while that in shrub layer and herb layer was opposite. The contribution rate of carbon storage in vegetation layer increased, while the contribution rate of carbon storage in soil layer decreased, and there was no significant change in litter layer. The annual net carbon sequestration of young and middle-aged forests was higher than that of young and middle-aged forests, indicating that the carbon sequestration capacity of *P. massoniana* plantation was strong and had a relatively high biological productivity level. Close-to-nature restoration can further enhance the carbon sequestration capacity of *P. massoniana* plantations of different forest ages. Improving vegetation layer biomass and soil carbon content, enhancing soil carbon sequestration capacity, optimizing forest structure, maintaining high productivity and reducing human disturbance are important measures to improve the carbon sink function of *P. massoniana* plantation ecosystem.

Key words: *Pinus massoniana* plantations; ecosystem; carbon storage; distribution pattern; forest age

责任编辑: 陆媛峰