

飞播马尾松林碳密度分配特征及其影响因素

潘 萍¹ 韩天一² 欧阳勋志^{1*} 刘苑秋¹ 臧 颢¹ 宁金魁¹ 杨 阳¹

(¹江西农业大学林学院, 南昌 330045; ²江西省林业调查规划研究院, 南昌 330046)

摘 要 研究江西省赣州市飞播马尾松林碳密度的分配特征,选取有关立地、林分、林下植被及凋落物等方面的15个因子,建立林分碳密度与影响因子的关系模型,筛选出主要影响因子。结果表明:林分平均碳密度为 $98.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,表现为土壤层 ($49.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 乔木层 ($45.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 林下植被层 ($2.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 凋落物层 ($1.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$);乔木层、凋落物层、土壤层碳密度之间呈显著正相关,其他各层次碳密度之间的相关性均不显著。株数密度、平均胸径、土层厚度、坡位、林龄、郁闭度是影响飞播马尾松林林分碳密度的主要因子,各因子的偏相关系数为 $0.331 \sim 0.434$, t 检验结果为显著;运用多元数量化模型 I 复相关系数为 0.796 , F 检验结果为显著 ($F=9.28$)。对于林分碳密度,株数密度以 $1500 \sim 2100 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 最好,而郁闭度以 $0.4 \sim 0.7$ 最好,株数密度及郁闭度过高或过低对林分固碳能力均会产生不利影响;林龄及平均胸径越大、土层越厚,其林分碳密度越高,下坡位的林分碳密度高于其他坡位。

关键词 马尾松; 飞播林; 碳密度; 分配特征

Carbon density distribution characteristics and influencing factors in aerially seeded *Pinus massoniana* plantations. PAN Ping¹, HAN Tian-yi², OUYANG Xun-zhi^{1*}, LIU Yuan-qiu¹, ZANG Hao¹, NING Jin-kui¹, YANG Yang¹ (¹College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; ²Jiangxi Province Forestry Survey Planning Institute, Nanchang 330046, China).

Abstract: The distribution characteristics of carbon density under aerially seeded *Pinus massoniana* plantations in Ganzhou City of Jiangxi Province were studied. Total 15 factors, including site, stand, understory vegetation, litter and so on were selected to establish a relationship model between stand carbon density and influencing factors, and the main influencing factors were also screened. The results showed that the average carbon density was $98.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ at stand level with soil layer ($49.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > tree layer ($45.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > understory vegetation layer ($2.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > litter layer ($1.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). Significantly positive correlations were found among the tree, litter and soil layers, but not among the other layers. The main factors were tree density, average diameter at breast height (DBH), soil thickness, slope position, stand age and canopy density to affect carbon density in aerially seeded *P. massoniana* plantations. The partial correlation coefficients of the six main factors ranged from 0.331 to 0.434 with significance by t test. The multiple correlation coefficient of quantitative model I reached 0.796 with significance by F test ($F=9.28$). For stand density, the best tree density and canopy density were $1500 \sim 2100 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $0.4 \sim 0.7$, respectively. The moderate density was helpful to improve ecosystem carbon sequestration. The carbon density increased with increasing stand age, DBH and soil thickness, and was higher in lower than middle and upper slope positions.

Key words: *Pinus massoniana*; aerially seeded plantation; carbon density; distribution characteristics.

森林生态系统是陆地生态系统的主体,也是最大的陆地碳库,约占全球陆地总碳库的 46%,在全球碳循环和减缓气候变暖中起着重要作用^[1].碳密度是衡量森林生态系统固碳能力的重要指标之一,合理的经营措施及科学的森林管理能够有效提高森林的碳密度^[2].目前,对森林碳密度的研究多集中于某区域碳密度的分异规律,以及对不同森林类型、不同层次及不同生长阶段碳密度的比较分析,而对碳密度的影响因素研究较少.有研究表明,影响森林碳密度的因素主要有森林类型^[3-4]、林龄^[5-6]、密度^[7-8]、起源^[9]、立地条件^[10]、人为干扰措施及强度^[11-12]等,但多数研究基于对某一、两个影响因素分析,缺乏对影响碳密度因素的综合分析.由于不同森林类型碳密度的分配特征及其主要影响因素可能存在差异.因此,掌握碳密度的分配特征及综合分析其影响因素将有利于制订合理的经营措施,为其碳汇林业的经营与管理提供科学依据.

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国亚热带地区主要针叶树种,具有适应性强、耐干旱与贫瘠的特点.目前对马尾松林的生物量、碳储量及碳密度开展了研究,主要集中在人工林与天然林^[13-15],而对飞播马尾松林碳密度的研究较少^[9].由于飞播林在林分结构等方面与其他人工林及天然林均存在一定程度的差异,而且主要分布在原植被破坏程度大及水土流失较严重的区域,其碳密度的分配情况及主要影响因素尚不清楚.为此,本文研究了江西省赣州市飞播马尾松林碳密度的分配特征及其影响因素,为开展碳汇林业的科学经营与管理提供科学参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

赣州市(24°29'—27°9' N, 113°54'—116°38' E)位于江西省南部,地处赣江上游,总面积 3.9×10⁴ km²,占全省总面积的 23.6%.地貌以山地和丘陵为主,成土母岩主要是花岗岩、千枚岩、板岩等,土壤以地带性红壤、黄壤为主.气候属亚热带季风气候区,年均温 19.1~20.8℃,年均降水量 1580 mm,无霜期 288 d,年均日照时数 1636 h.森林覆盖率达 76.2%,主要森林类型有针叶林、常绿阔叶林、针阔混交林、竹林等.在 20 世纪 60~90 年代,在人口较密集、植被破坏及水土流失较严重的丘陵区先后进行了大面积的飞播马尾松种子造林,目前飞播马尾松林占全市有林地面积的 21.4%,是研究区主要森林资源之一,林下植被主要有铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、五节

芒(*Miscanthus floridulus*)、欐木(*Loropetalum chinense*)等.在 20 世纪 90 年代,对部分飞播马尾松纯林按不同比例补植了木荷(*Schima superba*)等阔叶树.

1.2 研究方法

1.2.1 标准地设置及调查 根据林分因子(树种组成、密度、林龄等)、立地条件(坡向、坡位、坡度、土层厚度等)、林下植被(盖度、高度)等因子的差异,在飞播马尾松林主要分布区的兴国县、于都县、宁都县、瑞金市、南康区、赣县等选择具有代表性的地块设置标准样地,标准地面积大小根据地形及林分状况等确定,有 800 m²(28.28 m×28.28 m)、900 m²(30 m×30 m),共设置 50 个标准地.其中:按林龄,11~20、21~30、31~40、41~50 年的标准地分别有 11、15、13、11 个;按郁闭度,<0.4、0.4~0.7、≥0.7 的标准地分别有 13、17、20 个;按坡位,上坡、中坡、下坡的标准地分别有 14、18、18 个.在标准地上、中、下坡布设 2 m×2 m 灌木样方 3 个,在所选灌木样方中各设置 1 个 1 m×1 m 的草本样方和 1 m×1 m 的凋落物样方.标准地土壤类型均为红壤,成土母岩为花岗岩.对标准地内所有胸径≥5 cm 的乔木进行每木调查,测定林分及立地等因子,其中,郁闭度采用测线法测定.按每 10 年为一个龄级,每个龄级选 5 个标准地分别对马尾松和木荷取标准木,共计 40 株标准木,对每株标准木的干、枝、叶、根(粗、中、细根)取样,测定碳含量.调查林下植被种类、数量、盖度和生物量,灌木、草本及凋落物的生物量调查采用样方收获法,每个样方内的灌木分枝、叶、根,草本分地上、地下,凋落物按分解程度不同划分为未分解(凋落物保持原状,外表没有分解痕迹)和半分解(凋落物原状不完整,多分解成碎屑),分别收集并称量鲜质量,取样后测定含水率及碳含量,以估算林下植被及凋落物层的生物量和碳密度.在每个标准地内选择代表性地块挖 1 m 深(未达 1 m 的挖至母岩)的土壤剖面,采用环刀法(体积为 100 cm³)按 0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm 土层分别取样,测定土壤容重,每层取 1 kg 土壤带回实验室自然风干,测定土壤碳含量.

1.2.2 碳密度的计算 少量标准地零星分布杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和枫香(*Liquidambar formosana*)等,其所占比例较小,因此,在计算生物量及碳密度时,将杉木等针叶树作为马尾松,枫香等阔叶树作为木荷进行计算.乔木层生物量根据每木检尺结果分别采用肖欣^[16]和程煜等^[17]拟合的马尾

松、木荷各器官(干、枝、叶、根) $W=aD^b$ 异速生长方程计算.将乔木树种、林下植被、凋落物及土壤样品研磨粉碎,过 0.25 mm 筛后测定其碳含量.所有样品均采用重铬酸钾氧化-外加热法测定碳含量.植被碳密度为各组分生物量乘以对应的碳含量.土壤碳密度的计算基于各土层碳含量、土壤容重、土层厚度,土壤碳密度(D_{SOC} , $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 计算公式为^[18]:

$$D_{\text{SOC}} = \sum_{i=1}^k C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 10$$

式中: C_i 为土壤碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 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 mm 的石砾所占体积百分比 (%); k 为土层数.

乔木层、林下植被层、凋落物层的碳密度为各组分碳密度之和,林分碳密度为乔木层、林下植被层、凋落物层以及土壤层的碳密度之和.

1.3 数据处理

数量化模型 I 的数学原理是建立某个因子与数量因子或非数量因子之间的线性关系,公式如下:

$$y_k = B_0 + \sum_{j=1}^{p_1} \sum_{i=1}^{m_j} B(j,i) \delta_k(j,i) + \sum_{j=p_1+1}^p B(j) x_{kj}$$

式中: y_k 为第 k 点的因变量值; $\delta_k(j,i)$ 为第 k 点第 j 定性因子第 i 等级的得分(或 0 或 1); x_{kj} 为第 k 点第 j 定量因子的观测值; B_0 为常数项; $B(j,i)$ 为第 j 定性因子第 i 等级的得分; $B(j)$ 为第 j 定量因子的回归系数; m_j 为第 j 定性因子的等级数.为衡量各项目在模型中的贡献,计算各项目的得分范围,得分范围越大,则该项目影响越大.

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析.采用 Pearson 相关分析法分析各层次碳密度之间的相关性 ($\alpha=0.05$).运用多元数量化模型 I 对数据进行建模,分析各环境因子对碳密度的影响.表中数据为平均值±标准差.

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析.采用 Pearson 相关分析法分析各层次碳密度之间的相关性 ($\alpha=0.05$).运用多元数量化模型 I 对数据进行建模,分析各环境因子对碳密度的影响.表中数据为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 林分碳密度分配特征及其相关性

由表 1 可知,林分平均碳密度为 $98.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表现为土壤层>乔木层>林下植被层>凋落物层,其中土壤层占林分碳密度的比例最大,为 50.4%;凋落物层最小,为 1.3%.按照变异系数 (CV) 的划分等级: $CV<10\%$, 弱变异性; $10\% \leq CV \leq 100\%$, 中等变异性; $CV>100\%$, 强变异性^[19].各层次碳密度变异程度均属于中等变异性,变异程度大小为凋落物层>林下植被层>乔木层>土壤层.凋落物层和林下植被层碳密度虽然占林分碳密度比例较小,但其变异程

表 1 不同层次碳密度特征
Table 1 Carbon density characteristics of different layers

项目 Item	平均值 Mean ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	变异系数 CV (%)	所占比例 Proportion (%)
乔木层 Tree layer	45.25±27.49	60.8	46.0
林下植被层 Understory vegetation layer	2.23±1.45	65.0	2.3
凋落物层 Litter layer	1.23±0.89	72.4	1.3
土壤层 Soil layer	49.58±11.01	22.2	50.4
合计 Total	98.29±24.48	24.9	100

度却较大,这可能因为林下植被、凋落物的生物量受郁闭度等林分因子以及坡位、微地形等立地因子的综合影响;乔木层碳密度的变异主要由林龄、株数密度等不同引起的;土壤层碳密度的变异主要与土壤类型、质地、土层厚度等因子有关,由于本研究样地土壤均为花岗岩发育而成的红壤,土壤性状差异较小,因此,土壤碳密度变异程度最小.

由表 2 可知,乔木层与土壤层的碳密度呈显著正相关,凋落物层与乔木层、土壤层的碳密度均呈显著正相关,其他层次碳密度之间的相关性均不显著.这表明乔木层、凋落物层及土壤层之间相互促进作用的程度较大,其原因可能是凋落物主要来源于上层乔木,乔木树种的根系对土壤性状的影响较大,土壤中的碳主要来源于根系分泌物、凋落物和细根的分解等.

2.2 林分碳密度影响因子

2.2.1 模型的建立 参考文献[9,11]及结合飞播马尾松林的特征和标准地基本概况,选取影响其碳密度的因子并对其进行分解(表 3).影响因子有立地因子(海拔、坡位、坡度、坡向、土层厚度和腐殖质层厚度)、林分因子(株数密度、郁闭度、树种组成、林龄和平均胸径)、林下植被因子(林下植被盖度、林下植被高度)及凋落物因子(凋落物盖度、凋落物厚度)等 15 个因子.由于标准地的土壤类型均为红壤,其土壤质地等相差不大,因此未考虑这些因子.

表 2 不同层次碳密度相关性分析
Table 2 Correlation analysis of carbon density of different layers

	乔木层 Tree layer	林下植被层 Understory vegetation layer	凋落物层 Litter layer
林下植被层 Understory vegetation layer	-0.124		
凋落物层 Litter layer	0.391 **	0.013	
土壤层 Soil layer	0.327 *	0.251	0.436 **

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. 下同 The same below.

以林分碳密度为因变量,选取的影响因子(包括定性和定量项目)为自变量,运用多元数量化模型 I,对 15 个因子进行建模,根据结果进行偏相关检验,把相关系数小的、差异性不显著的项目剔除掉,再对剩下的项目重新建模,反复进行.最后筛选出坡位、土层厚度、株数密度、郁闭度、林龄、平均胸径 6 个主要影响因子,模型如下:

$$y=103.211-6.801x_{11}-3.470x_{12}-32.433x_{21}-$$
$$12.468x_{22}+0.799x_{31}+8.648x_{32}+2.741x_{33}-0.359x_{41}+2.756x_{42}-11.067x_{51}-3.435x_{52}-1.576x_{53}+1.371x_6$$

在模型检验中,偏相关系数采用 t 检验,其结果均为显著;复相关系数用 F 检验,检验结果为显著,所以筛选出的 6 个因子与飞播马尾松林碳密度具有显著的关系.模型运算结果及各类目得分值和项目分值极差见表 4.

2.2.2 立地因子对碳密度的影响 由表4可知,立

表 3 碳密度影响因子分解
Table 3 Decomposition of influencing factors of carbon density

项目 Item	类目 Sub-item			
	1	2	3	4
海拔 Altitude (m)	低丘(<100)	中丘(100~249)	高丘(250~499)	
坡位 Slope position	上坡	中坡	下坡	
坡向 Slope aspect	阳坡	半阳坡	半阴坡	阴坡
坡度 Slope gradient (°)	缓坡(6~15)	斜坡(16~25)	陡坡(26~35)	急坡(36~45)
土层厚度 Soil layer thickness (cm)	薄(<40)	中(40~80)	厚(≥80)	
腐殖质层厚度 Humus layer thickness (cm)	薄(<10)	中(10~20)	厚(≥20)	
林下植被盖度 Understory vegetation coverage (%)	<30	30~60	60~90	≥90
林下植被高度 Understory vegetation height (m)	<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	≥1.5
凋落物盖度 Litter layer coverage (%)	<30	30~60	60~90	≥90
凋落物厚度 Litter layer thickness (cm)	薄(<1)	中(1~3)	厚(≥3)	
株数密度 Density of trees (plant·hm ⁻²)	<1500	1500~2100	2100~2700	≥2700
郁闭度 Canopy density	<0.4	0.4~0.7	≥0.7	
树种组成 Species composition	10P	8P2S	7P3S	6P4S
林龄 Stand age (a)	11~20	21~30	31~40	41~50
平均胸径 Average DBH (cm)				

P: 马尾松 *Pinus massoniana*; S: 木荷 *Schima superba*; 10P: 马尾松纯林 *Pinus massoniana* pure plantation; 8P2S、7P3S、6P4S: 马尾松和木荷的混交比例分别为 8:2、7:3 和 6:4 Different mixing proportions of *Pinus massoniana* and *Schima superba* respectively were 8:2, 7:3 and 6:4.

表 4 模型运算结果
Table 4 Operational results of the model

项目 Item	项目代号 Item code	类目代号 Sub-item code	得分值 Score	分值极差 Score range	偏相关系数 Partial correlation coefficient	t 检验 t test
坡位 Slope position	x_1	1	-6.801	6.801	0.362	2.39 *
		2	-3.470			
		3	0			
土层厚度 Soil layer thickness	x_2	1	-32.433	32.433	0.368	2.44 *
		2	-12.468			
		3	0			
株数密度 Density of trees	x_3	1	0.799	8.648	0.434	2.97 * *
		2	8.648			
		3	2.741			
		4	0			
郁闭度 Canopy density	x_4	1	-0.359	3.125	0.331	2.16 *
		2	2.756			
		3	0			
林龄 Stand age	x_5	1	-11.067	11.067	0.359	2.37 *
		2	-3.435			
		3	-1.576			
		4	0			
平均胸径 Average DBH	x_6		1.371	1.371	0.386	2.58 *

$t_{0.01}(49)=2.68$; $t_{0.05}(49)=2.01$; $F_{0.01}(6,49)=3.20$; $r^2=0.796$; $F=9.28$.

地因子中对飞播马尾松林碳密度影响显著的有土层厚度和坡位 2 个因子. 土层厚度以 ≥ 80 cm 的碳密度最大, < 40 cm 的最小, 其分值得差达 32.433, 说明土层厚度对碳密度的影响程度大, 土层越厚其林分碳密度越大. 从不同坡位的得分值可知, 下坡的碳密度最好, 中坡的次之, 上坡的最差.

在建模过程中, 所选的海拔、坡向、坡度、腐殖质层厚度 4 个立地因子与飞播马尾松碳密度的相关系数较小, 影响不显著. 这可能是因为飞播区主要为丘陵区, 海拔变化幅度不大, 丘陵区坡向对光照的影响较小, 所以海拔、坡向不同导致的水、热、湿度等因子差异不大, 对林木的生长影响较小; 马尾松是深根系树种, 主根发达, 其林龄最小的也接近 20 年, 其林木生长受坡度、腐殖质层厚度的影响也不明显.

2.2.3 林分因子对碳密度的影响 由表 4 可知, 林分因子中林龄、株数密度、郁闭度和平均胸径对飞播马尾松林碳密度的影响程度依次减小, 但影响均显著. 林龄以 41~50 年的碳密度最大, 31~40 年与 21~30 年的中等, < 20 年的最小; 株数密度与飞播马尾松林碳密度以株数密度 $1500 \sim 2100$ 株 \cdot hm^{-2} 最好, 其次为 $2100 \sim 2700$ 株 \cdot hm^{-2} 、 < 1500 株 \cdot hm^{-2} , 最差为 ≥ 2700 株 \cdot hm^{-2} , 这表明株数密度过高或过低均不利于林分碳密度的提高; 郁闭度对林分碳密度的影响程度由大到小为 $0.4 \sim 0.7$ 、 ≥ 0.7 、 < 0.4 ; 碳密度随着平均胸径的增加呈增加的趋势.

虽然株数密度与郁闭度存在一定的关系, 但在立地条件等因子差异较大的情况下, 即使株数密度一样, 也可能导致郁闭度相差较大. 因此, 为有效提高林分碳密度, 应依据株数密度及郁闭度综合确定调控措施. 此外, 本研究筛选的树种组成这一林分因子对林分碳密度的影响不显著, 主要是因为当时补植的株数密度相似, 而补植的树种都是木荷, 其生长速度与马尾松相差不大, 致使林木的生长量差异不大.

2.2.4 林下植被及凋落物对碳密度的影响 在建模中, 林下植被盖度、高度以及凋落物盖度、厚度对林分碳密度的影响均不显著. 这可能是因为林下植被及凋落物的生物量占林分植被总生物量的比例较小, 而植被的碳密度占整个林分的碳密度也不是最大, 使得林下植被和凋落物的碳密度占林分总碳密度的比例均较小, 所以影响不显著.

3 讨 论

3.1 林分碳密度分配特征

本研究中, 飞播马尾松林的平均碳密度为 98.29

$\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 低于王兵等^[20]和庞宏东等^[13]研究得出的江西省马尾松林平均碳密度 $115.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和湖北省天然马尾松林平均碳密度 $121.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 这可能是因为飞播马尾松林是在水土流失较为严重的区域形成的, 其土壤等立地条件普遍较差, 从而影响林木的生长以及土壤的固碳能力. Xiao 等^[9]研究表明, 天然马尾松林的固碳能力总体上优于飞播马尾松林. 从飞播马尾松林林分各层碳密度分配来看, 土壤层 $>$ 乔木层 $>$ 林下植被层 $>$ 凋落物层, 这与较多学者的结论相一致^[21-22], 而长沙市 13 年生马尾松人工林碳密度表现为土壤层 $>$ 乔木层 $>$ 凋落物层 $>$ 林下植被层^[23], 可能是因为林下植被层与凋落物层碳密度大小主要与森林抚育等人为干扰强度有关, 如砍杂等抚育措施使林下植被层生物量减少而凋落物层生物量增加. 肖欣^[16]研究表明, 马尾松林的乔木层与土壤层碳密度呈显著正相关, 而其他层次间的碳密度相关性均不显著. 这与本研究结果并不完全一致.

3.2 林分碳密度影响因子

大量研究表明, 森林类型是影响森林碳密度的主要影响因素之一^[3-4, 24], 而对于不同区域同一森林类型, 其影响碳密度的主要因素及其规律性也不尽相同. 如张国庆等^[7]对四川 21 年生马尾松人工林 3 种密度 (1245 、 1620 、 2070 株 \cdot hm^{-2}) 林分的碳密度研究表明, 其总碳密度随着林分密度的增加呈减小趋势; 丁波等^[8]对贵州 12 年生马尾松人工林 4 种林分密度的碳储量研究表明, 以 1800 株 \cdot hm^{-2} 最大, 更高或更低的密度其碳储量均下降. 本研究表明, 飞播马尾松林林分碳密度以 $1500 \sim 2100$ 株 \cdot hm^{-2} 最好, 其原因可能是, 株数密度过高, 其树木之间对光照、养分等的竞争强度大, 林木生长不良; 而过低则直接导致单位面积的生长量较小, 从而导致其碳密度较低; 同时, 本研究得到, 飞播马尾松林林分碳密度在郁闭度为 $0.4 \sim 0.7$ 最好, 可能是郁闭度的大小直接决定林内的光照条件, 林内光照强度随着郁闭度的增大而减小, 光照强度的不同会引起土壤温湿度、林下植被盖度、凋落物分解速率等的差异. 这些差异对林木、林下植被及凋落物的生长量会产生影响, 而合适的郁闭度有利于提高植被总生物量, 因此, 株数密度及郁闭度过高或过低对林分固碳能力均会产生不利的影响. 有研究表明, 随着林龄的增加, 马尾松林林分总碳密度增大^[25-27]. 这与本研究结果相一致, 主要是因为随着年龄的增加林木的生物量增大, 其林分碳密度也会增大. 有研究表明, 马尾松与阔叶树混交能够提高马尾松林的固碳能

力^[28-29].在立地因子对碳密度的影响方面,本研究得出,飞播马尾松林土层越厚则下坡位的林分碳密度越高.这一结果与相关研究得到的结论类似^[30-32],其主要原因是:土层越厚,其土壤的固碳能力越强,同时林木的生长与土层厚度也密切相关,对于同一树种,一般来说,土层越厚,林木长势越好,从而提高了林木的碳密度;而下坡位的林分碳密度高于其他坡位,是因为飞播马尾松林是在水土流失较严重背景下形成的,其长期的地表径流作用导致下坡位的土层比上坡位厚,以及下坡位的土壤水分、养分比上坡位的更丰富,使得下坡位的林木生长以及林下植被恢复均好于上坡位.因此,坡位直接影响土层厚度及植被生长,从而造成不同坡位的土壤及植被碳密度的差异.

此外,虽然林下植被层、凋落物层碳密度占林分总碳密度的比例小,但其可以防止地表水土流失、有效保持土壤对碳的吸存,在维持土壤肥力和生态系统稳定性等方面^[33]以及在森林生态系统碳循环中发挥着极为重要的作用^[34].因此,在碳汇林业经营中同样不容忽视.

参考文献

- [1] Ruiz-Peinado R, Bravo-Oviedo A, Lopez-Senespleda E, *et al.* Do thinnings influence biomass and soil carbon stocks in Mediterranean maritime pine woods? *European Journal of Forest Research*, 2013, **132**: 253-262
- [2] Fahey TJ, Woodbury PB, Battles JJ, *et al.* Forest carbon storage: Ecology, management, and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2010, **8**: 245-252
- [3] Peng W (彭 妮), Dong L-H (董利虎), Li F-R (李凤日). Carbon storage of forest vegetation and allocation for main forest types in the east of Daxing'an Mountains based on additive biomass model. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2016, **27**(12): 3749-3758 (in Chinese)
- [4] Zhen W (甄 伟), Huang M (黄 玫), Zhai Y-L (翟印礼), *et al.* Variation of forest vegetation carbon storage and carbon sequestration rate in Liaoning Province, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2014, **25**(5): 1259-1265 (in Chinese)
- [5] Cheng CH, Hung CY, Chen CP, *et al.* Biomass carbon accumulation in aging *Japanese cedar* plantations in Xitou, Central Taiwan. *Botanical Studies*, 2013, **54**: 1-9
- [6] Yang Y-J (杨玉姣), Chen Y-M (陈云明), Cao Y (曹 扬). Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2014, **34**(8): 2128-2136 (in Chinese)
- [7] Zhang G-Q (张国庆), Huang C-D (黄从德), Guo H (郭 恒), *et al.* Spatial distribution property of carbon stocks in artificial pine ecosystems with different density. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology (浙江林业科技)*, 2007, **27**(6): 10-14 (in Chinese)
- [8] Ding B (丁 波), Ding G-J (丁贵杰), Zhang Y-R (张耀荣). Effects of density regulation on carbon storage of *Pinus massoniana* plantation ecosystem. *Journal of Northwest Forestry University (西北林学院学报)*, 2016, **31**(3): 197-203 (in Chinese)
- [9] Xiao X, Wei XH, Liu YQ, *et al.* Aerial seeding: An effective forest restoration method in highly degraded forest landscapes of sub-tropic regions. *Forests*, 2015, **6**: 1748-1762
- [10] Cheng X-R (成向荣), Yu M-K (虞木奎), Wu T-G (吴统贵), *et al.* Effect of site condition on carbon storage of *Quercus acutissima* plantations. *Ecology and Environmental Sciences (生态环境学报)*, 2012, **21**(10): 1674-1677 (in Chinese)
- [11] Ming A-G (明安刚), Zhang Z-J (张治军), Chen H-H (湛红辉), *et al.* Effects of thinning on the biomass and carbon storage in *Pinus massoniana* plantation. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 2013, **49**(10): 1-6 (in Chinese)
- [12] Wu P-H (武朋辉), Dang K-L (党坤良), Chang W (常 伟), *et al.* Effects of forest thinning on carbon density of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural secondary forest on southern slope of Qinling Mountains. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science) (西北农林科技大学学报:自然科学版)*, 2016, **44**(10): 75-82 (in Chinese)
- [13] Pang H-D (庞宏东), Wang X-R (王晓荣), Zhang J-L (张家来), *et al.* Characteristics of carbon storage and carbon density of *Pinus massoniana* natural forests in Hubei Province, China. *Journal of Northeast Forestry University (东北林业大学学报)*, 2014, **42**(7): 40-43 (in Chinese)
- [14] Du H (杜 虎), Song T-Q (宋同清), Zeng F-P (曾馥平), *et al.* Biomass and its allocation in *Pinus massoniana* plantation at different stand ages in east Guangxi. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica (西北植物学报)*, 2013, **33**(2): 394-400 (in Chinese)
- [15] Pan P (潘 鹏), Lyu D (吕 丹), Ouyang X-Z (欧阳勋志), *et al.* A study on biomass and carbon storage of natural *Pinus massoniana* forest at different stand growing stages in central Jiangxi Province. *Acta Agricolae Universitatis Jiangxiensis (江西农业大学学报)*, 2014, **36**(1): 131-136 (in Chinese)
- [16] Xiao X (肖 欣). A Comparative Study on the Temporal and Spatial Distribution of Carbon Density in Aerially-Seeded Plantation and Natural Forest of *Pinus massoniana*. Master Thesis. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [17] Cheng Y (程 煜), Hong W (洪 伟), Wu C-Z (吴承祯), *et al.* Distribution characters of *Schima superba* aboveground biomass and its productivity. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology (应用与环境*

- 生物学报), 2009, **15**(3): 318–322 (in Chinese)
- [18] Rodriguez-Murillo JC. Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, **33**: 53–61
- [19] Li L (李 龙), Yao Y-F (姚云峰), Qin F-C (秦富仓), *et al.* Spatial variations of organic carbon of Huanghuanzi watershed in Chifeng. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2014, **34**(3): 742–748 (in Chinese)
- [20] Wang B (王 兵), Wei W-J (魏文俊). Carbon storage and density of forests in Jiangxi Province. *Jiangxi Science* (江西科学), 2007, **25**(6): 681–687 (in Chinese)
- [21] Cao X-Y (曹小玉), Yang W-L (杨文龙), Liu Y-C (刘悦翠). Carbon storage quantity of *Pinus massoniana* ecosystem. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2012, **27**(5): 45–49 (in Chinese)
- [22] Zhang Z-J (张治军), Zhang X-Q (张小全), Wang Y-H (王彦辉), *et al.* Carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* forest ecosystem in Tieshanping of Chongqing. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2009, **45**(5): 49–53 (in Chinese)
- [23] Wu T (巫 涛), Peng C-H (彭重华), Tian D-L (田大伦), *et al.* Spatial distribution of carbon storage in a 13-year-old *Pinus massoniana* forest ecosystem in Changsha City, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(13): 4034–4042 (in Chinese)
- [24] Zhu J-J (朱建佳), Dai E-F (戴尔阜), Zheng D (郑度), *et al.* Carbon density and allocation of forest ecosystems of Moshao Forest Farm at Huitong National Research Station of forest ecosystem. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2016, **31**(11): 1871–1880 (in Chinese)
- [25] Wei H-D (尉海东), Ma X-Q (马祥庆). Study on the carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* lamb plantation ecosystem at different growing stages. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2007, **35**(1): 171–174 (in Chinese)
- [26] Tao Y-H (陶玉华), Feng J-C (冯金朝), Ma L-Y (马麟英), *et al.* Carbon storage and distribution of Masson pine, Chinese fir and eucalyptus plantations at Liuzhou, Guangxi Province. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2011, **20**(11): 1608–1613 (in Chinese)
- [27] Fang X (方 晰), Tian D-L (田大伦), Xu C-H (胥灿辉). Productivity and carbon dynamics of Masson pine plantation. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 2003, **23**(2): 11–15 (in Chinese)
- [28] Fan H-B (樊后保), Li Y-Y (李燕燕), Su B-Q (苏兵强), *et al.* Allocation pattern of biomass and productivity in the mixed uneven-aged stands of Masson's pine and hardwood species. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(8): 2463–2473 (in Chinese)
- [29] Chen M-F (陈模芳), Ding G-J (丁贵杰), Zhai S-S (翟帅帅), *et al.* Study on biomass and carbon storage of different community types of *Pinus massoniana*. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* (中南林业科技大学学报), 2016, **36**(7): 76–80 (in Chinese)
- [30] Xu K-J (徐凯健), Xie J-S (谢锦升), Zeng H-D (曾宏达), *et al.* Driving factors and spatiotemporal dynamics of carbon storage of a *Pinus massoniana* plantation in reddish soil erosion region with ecological restoration. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2016, **14**(1): 89–96 (in Chinese)
- [31] Huang S-L (黄绍霖), Xu H-Q (徐涵秋), Zeng H-D (曾宏达), *et al.* Analysis of spatial and temporal dynamics of carbon storage of *Pinus massoniana* forest in the Hetian basin in County Changting of Fujian Province, China. *Earth Science* (地球科学), 2013, **38**(5): 1081–1090 (in Chinese)
- [32] Chen F-S (陈伏生), Zhang Y-M (张园敏), Hu X-F (胡小飞), *et al.* The pattern of ecosystem carbon stock in steep slope wild shrubs and neighboring forest plantation in hilly red soil area. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2012, **26**(1): 151–155 (in Chinese)
- [33] Vander Schaaf CL. Estimating understory vegetation response to multi-nutrient fertilization in Douglas-fir and ponderosa pine stands. *Journal of Forest Research*, 2008, **13**: 43–51
- [34] Sayer EJ. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 2006, **81**: 1–31

作者简介 潘 萍, 女, 1988 年生, 博士研究生. 主要从事森林资源管理与监测研究. E-mail: panping0306@163.com

责任编辑 孙 菊