

DOI: 10.5846/stxb202011172960

代林利, 周丽丽, 伍丽华, 刘丽, 黄樱, 彭婷婷, 邱静雯, 何宗明, 曹光球. 不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征. 生态学报, 2022, 42(2): 710-719.

Dai L L, Zhou L L, Wu L H, Liu L, Huang Y, Peng T T, Qiu J W, He Z M, Cao G Q. Carbon density and vertical spatial distribution characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem with different stand density. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 710-719.

不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征

代林利¹, 周丽丽², 伍丽华¹, 刘丽¹, 黄樱¹, 彭婷婷¹, 邱静雯¹, 何宗明^{1,3}, 曹光球^{1,3,*}

¹ 福建农林大学林学院, 福州 350002

² 闽江学院海洋研究院, 福州 350108

³ 国家林业和草原局杉木工程技术研究中心, 福州 350002

摘要:以不同林分密度(1800、3000、4500 株/hm²)杉木林为研究对象,通过野外调查、样品采集和室内分析,研究不同林分密度杉木林生态系统碳密度及其分配特征。结果表明:1)三种林分密度杉木林生态系统碳密度分别为 131.54、161.42、172.69 t/hm²,随林分密度增大而升高,且具有显著差异($P<0.05$)。杉木林碳密度表现为土壤层>乔木层>林下地被物层。土壤有机碳储量占总碳储量的比例最大(53.11%—67.37%),其次是树干、树根、树皮(25.89%—35.74%),高密度杉木林分有利于树干、树皮、树根碳密度分配比例的增加。2)乔木层,树干、树皮、宿留枯枝及宿留枯叶碳密度随林分密度增大而升高,鲜枝及鲜叶碳密度随林分密度增大先升高后降低,且均具显著差异($P<0.05$);树干、树皮碳密度随树体高度的升高而降低,鲜枝鲜叶碳密度集中于树体中上部(8 m≤h≤10 m),宿留枯枝枯叶碳密度集中分布于树体中部(4 m≤h≤8 m)。3)随着林分密度的增大,不同径级根碳密度呈上升趋势,且不同径级根碳密度随林分密度变化差异达显著水平($P<0.05$);不同径级间碳密度:根头>粗根>大根>中根>小根>细根,根头和粗根占比最大(57.38%—70.84%)。4)林下植被碳密度随林分密度增大不断降低,而林下凋落物碳密度随林分密度增大呈逐渐上升趋势,且具显著差异($P<0.05$)。5)土壤层碳密度随土壤深度增加逐渐降低,不同林分密度土壤层碳密度没有显著差异($P>0.05$)。综上所述,适当增加林分密度有利于提高杉木林生态系统的碳密度。

关键词:杉木人工林;造林密度;碳密度;分配特征

Carbon density and vertical spatial distribution characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest ecosystem with different stand density

DAI Linli¹, ZHOU Lili², WU Lihua¹, LIU Li¹, HUANG Ying¹, PENG Tingting¹, QIU Jingwen¹, HE Zongming^{1,3}, CAO Guangqiu^{1,3,*}

¹ College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

² Institute of Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China

³ Cunninghamia lanceolata Engineering and Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Fuzhou 350002, China

Abstract: *Cunninghamia lanceolata* plantation with densities of 1800, 3000 and 4500 plants/hm² were employed to investigate the carbon density and its distribution characteristics of *C. lanceolata* forest ecosystem under different stand densities through field investigation, sample collection and analysis. The results showed that: 1) the carbon density in the *C. lanceolata* ecosystem with stand densities of 1800, 3000 and 4500 plants/hm² were 131.54 t/hm², 161.42 t/hm² and

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0600300);福建省林业科技项目(闽林科便函[2019]16号)

收稿日期:2020-11-17; **网络出版日期:**2021-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cncgq@126.com

172.69 t/hm², respectively, and increased significantly with the increase of stand densities ($P < 0.05$). The carbon density of *C. lanceolata* forest followed the order of soil layer > tree layer > understory layer. Soil organic carbon storage accounted for the largest proportion of total carbon storage (53.11%—67.37%), followed by trunk, root and bark (25.89%—35.74%). High stand density could increase the carbon density distribution portion in trunk, bark and root. 2) The carbon density of tree layer, trunk, bark and persistent withered branches and leaves increased with the increase of stand densities, while the carbon density of fresh branches and leaves displayed first increase and then decrease tendency with the increasing stand densities, which all showed significantly decreased with the increase of stand densities ($P < 0.05$). The carbon density of trunk and bark decreased with the increase of tree height. The carbon density of fresh branches and leaves were relatively high in the middle and upper part of tree ($8 \text{ m} \leq h \leq 10 \text{ m}$), while for withered branches and leaves, higher carbon density was observed in the middle of the tree ($4 \text{ m} \leq h \leq 8 \text{ m}$). 3) The carbon density in roots of different diameter increased significantly with the increase of stand densities ($P < 0.05$). The carbon density among different roots diameter was as follows: root head > coarse root > big root > middle root > small root > fine root, and root head and coarse root accounted for the largest portion (57.38%—70.84%). 4) The carbon density of undergrowth vegetation decreased with the increase of stand densities, while the opposite trend was observed for litter, which showed significantly decreased with the increase of stand densities ($P < 0.05$). 5) The carbon density of soil layer decreased with the increase of soil depth, and no significant difference was observed for different stand densities ($P > 0.05$). 6) In summary, appropriate increase stand density is beneficial to improve the carbon density of *C. lanceolata* forest ecosystem.

Key Words: *Cunninghamia lanceolata* plantation; planting density; carbon density; distributive characteristic

由于化石燃料的过量使用和人类活动的日益增加,大气中以二氧化碳(CO₂)为代表的温室气体浓度升高导致的全球气候变化问题已成为影响人类生产和发展的重要问题,通过减排和进行植树造林增加碳汇已成为缓解全球气候变化的重要手段^[1]。作为陆地生态系统的主要碳库,森林生态系统中的有机碳约占整个陆地生态系统的72%—98%,在维持大气碳平衡、减缓全球气候变暖等方面起着重要作用^[2—3]。因此,如何增强森林生态系统的固碳能力已成为当前森林生态学领域的热点问题。碳密度不仅是表示森林生态系统固碳能力的关键指标,同时也是评估其碳储量的重要依据^[4—5]。研究表明,森林生态系统碳密度不仅与气候、森林类型有关,而且还与立地条件、林龄和林分密度关系密切^[6]。其中林分密度对森林生态系统碳储量的影响尤为关键^[7]。因此,探明不同林分密度下森林生态系统碳密度分配规律和特征,对于森林碳储量的精确估算和森林碳汇的经营管理能提供基础数据和科学参考。

密度控制是森林经营管理中主要的技术措施之一^[8]。林分密度不仅影响林分环境,而且还会影响林木的生长、林下植被的发育及其各器官的生物量和分配,进而影响地上部分和地下部分之间的碳分配过程^[9—10]。牛春梅等^[6]研究结果表明,温度 and 水分等环境因子、林分密度和林龄等林分因子以及海拔和坡度等地形因子的综合作用是导致森林生态系统碳密度差异的最主要原因。不同的林分密度,由于其引起的林内光照、土壤温度及水分等一系列环境因子的变化,从而导致森林生态系统碳密度具有差异。林分密度对生态系统碳密度的影响较复杂且无一致的规律。Noh 等^[11]对赤松林的研究表明,随林分密度增大,乔木层碳储量无明显变化,但土壤层和总碳储量显著降低;丁波等^[12]对马尾松的研究表明,中密度调控下总碳储量最大。李瑞霞等^[13]对侧柏的研究表明,随林分密度增大,乔木层、土壤层和生态系统碳储量都显著降低。因此,林分密度对森林碳储量的影响还需进一步研究探讨。除此之外,国内外学者对于不同林分密度森林生态系统碳密度的研究,重点关注不同组分间的差异,而针对森林生态系统垂直空间碳密度差异及其分配的研究却尚未见相关报道。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国最重要的速生用材树种之一,主要分布在我国南方16个省(区)。第九次全国森林资源清查表明,杉木人工林的林分面积和蓄积均居于我国人工用材林树种的首位^[14—15]。因此,提升杉木林碳吸存能力对于提高我国森林的碳吸存总量意义重大。姚利辉等^[16]研究发现杉木林不同生长阶段植物固碳特征不同,受到植物生长生物学特性、林分结构、土壤肥力等影响;梁萌杰等^[17]研究发现杉木

人工林生态系统碳密度随着林龄增加而增加;尉海东等^[18]研究发现杉木林碳储量、年净固碳量随连栽代数的增加显著降低,然而针对不同密度杉木林生态系统碳密度及其垂直空间分配特征尚未见相关报道。为探讨不同林分密度对杉木人工林生态系统碳密度及其分配的影响,以福建农林大学莘口教学林场 12 年生不同密度(1800、3000、4500 株/hm²)杉木林为研究对象,在样地调查基础上,采用全树收获法获取杉木乔木层各器官、不同径级根、林下地被物层和土壤样品,并测定其生物量和碳含量,揭示不同密度杉木林生态系统各组分及其地上部分垂直空间的碳密度分配特征,以期对杉木人工林经营管理和碳汇管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验地设置

试验地位于福建农林大学莘口教学林场(E 117°26', N 26°11'),属典型的亚热带季风性气候区,年平均蒸发量为 1586.0 mm,年积温 5240.2—6677.9℃,年平均气温 19.1℃左右,年平均降雨量 1750.0 mm。海拔在 350 m,土壤为山地红壤,土层深度大于 1 m。2007 年 2 月份,采用完全随机区组试验设计,3 个完全随机区组,每个区组 3 个试验小区,每个小区面积 0.067 hm²,分别营建 1800、3000、4500 株/hm²不同密度杉木人工林。造林地前身为杉木采伐迹地。杉木种苗来源为第二代杉木种子园种子繁育的 1 年生实生苗。炼山,挖暗穴造林。造林当年 6 月中旬进行块状除草培土扶正,9 月中旬进行全面除草并补植;造林第二年 5 月份及 10 月份各劈草一次;造林第三年 10 月份劈草一次。主要林下植物有:苦竹(*Pleioblastus amarus*)、箬竹(*Indocalamus tessellatus*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、江南短肠蕨(*Allantodia metteniana*)、团叶鳞始蕨(*Lindsaea orbiculata*)、毛柄短肠蕨(*Allantodia dilatata*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)、金毛狗脊(*Dryopteris goeringiana*)、香花崖豆藤(*Millettia dielsiana*)、山矾(*Symplocos sumuntia*)等。

2019 年 5 月,在对 12 年生不同林分密度杉木人工林踏查的基础上,在每个试验林内设置 9 块 20 m×20 m 标准样地。对样地进行每木检尺,量测胸径、树高、枝下高、冠幅、郁闭度等指标,计算各样地平均胸径、平均树高、平均枝下高、平均冠幅作为标准木的选择依据。各样地杉木生长情况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic information of the sample plots

林分密度 Planting density/ (株/hm ²)	林龄 Age of stand	坡向 Aspect	坡度 Gradient/(°)	郁闭度 Canopy density	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average tree height/m	平均枝下高 Average under-branch height/m
1800(M1)	12	西北	32±2	0.65±0.05	13.15±3.79	12.43±1.88	5.71±1.58
3000(M2)	12	西北	31±2	0.72±0.08	14.70±2.71	13.34±1.63	8.23±0.78
4500(M3)	12	北	31±1	0.90±0.02	13.06±3.18	12.24±1.95	8.43±0.54

M1、M2、M3 分别代表杉木人工林林分密度 1800、3000、4500 株/hm²;表中胸径 DBH 为 diameter at breast height 的缩写

1.2 杉木林生态系统生物量调查

1.2.1 乔木层

为不破坏试验林,在各样地四周选取 1 株生长与计算数据最接近的标准木,每种密度选取 3 株,共选取 9 株。按 2 m 区分段取树体宿留枯枝枯叶后,齐地表伐倒平均木,再按 2 m 区分段分别取树干、树皮、鲜枝、鲜叶等样品。根系部分,以标准木树干为圆心,半径 1.5 m、深度 80 cm 范围内挖取树根。参考张艳杰等^[19]、王成等^[20]分类方法,再结合具体情况根据细根直径≤0.2 cm,小根直径 0.2<D≤0.5 cm,中根直径 0.5<D≤2 cm,大根直径 2<D≤5 cm,粗根直径 D>5 cm,根桩(去掉其它径级根系后的剩余部分)进行分级。各器官样品称重后各取 3 份样品(每份 1 kg)带回实验室,不足 1 kg 的样品全部带回,于 105℃的烘箱杀青 1 h 后,在 75℃的恒温条件下烘至恒重,并用精度为 0.01 g 的电子天平称干质量,求出标准木各器官的生物量,再根据林分密度估算出不同密度杉木林单位面积生物量。

单位面积生物体生物量(t/hm^2) = 标准木生物量(kg) \times 林分密度($\text{株}/\text{hm}^2$)/1000

1.2.2 林下地被物层

在每块标准样地内随机设置 5 块 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的小样方,将样方内的林下植被和凋落物分别收集并称其鲜重,每个林分密度各取 3 份样品带回实验室。生物量测定方法同乔木层。

1.3 杉木林生态系统碳含量与碳密度测定

1.3.1 乔木层和林下地被物层

样品烘干测完生物量后,用研磨机粉碎后过 0.149 mm 的筛,每一次都称取 0.1500 g 植物样品放置在干锅中,用德国 Elementar 元素分析仪 (Vario Max CN)测定碳含量。

乔木层和林下地被物层样品碳密度(t/hm^2)计算公式如下:

$$\text{AOC}_i = C_i \times B_i$$

式中, AOC_i 为各样品碳密度(t/hm^2); C_i 为各样品有机碳含量(g/kg); B_i 为对应样品单位面积生物量(t/hm^2)。

1.3.2 土壤层

在各样地内按“S”型路线分别挖取 4 个土壤剖面,按照 $0\text{—}20\text{ cm}$ 、 $20\text{—}40\text{ cm}$ 、 $40\text{—}60\text{ cm}$ 将土壤分为 3 个土层,用环刀在 3 个土层各采集 4 个土壤样品带回室内用于测定土壤的容重等物理性质。把同一层次的土壤样品混合均匀后作为该土层的样品,去除土壤中的石砾、植物根系等,过 2 mm 筛网后将其自然风干,取其中的部分土样过 0.149 mm 筛,用德国 Elementar 元素分析仪 (Vario Max CN)测定来测定碳含量。

某一土层的有机碳密度 SOC_i (t/hm^2) 计算公式如下:

$$\text{SOC}_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i) / 10$$

式中, C_i 为土壤有机碳含量(g/kg), D_i 为容重(g/cm^3), E_i 为土层厚度(cm), G_i 为大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比(%)。

1.4 数据处理

数据采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、差异性显著分析(T 检验和 Duncan 检验),用 SPSS22.0 软件进行分析。用 Microsoft Excel 2010 对数据进行平均值、标准误差分析和作图。

2 结果与分析

2.1 不同林分密度杉木林生态系统各组分碳含量、生物量与碳密度

2.1.1 乔木层生物量、碳含量、碳密度

从表 2 可以看出,树干和树皮碳密度均随林分密度增加而升高($P<0.05$),在 $0\text{—}4\text{ m}$ 升高明显,在 10 m —树梢时碳密度随林分密度增加而降低,不同密度树体中下部碳密度差异显著,而上部差异不显著。从垂直空间角度来看,同一林分密度树干和树皮碳密度均随高度升高而降低($P<0.05$),碳密度大量分布在树体中下部;宿留枯枝、宿留枯叶碳密度均随林分密度增加而升高, M3 宿留枯枝、宿留枯叶碳密度相对 M1 、 M2 碳密度提升量较大($P<0.05$);宿留枯枝碳密度在 $2\text{—}4\text{ m}$ 、 6 m —树梢逐渐升高,在 $4\text{—}6\text{ m}$ 先升高后下降;随林分密度增加,宿留枯叶碳密度在 6 m —树梢逐渐升高,在 $2\text{—}6\text{ m}$ 先升高后下降;宿留枯枝、宿留枯叶碳密度主要集中在树体中部。随高度的增加,除 M2 宿留枯枝碳密度在 $2\text{—}4\text{ m}$ 区分段呈上升趋势,在 $4\text{—}10\text{ m}$ 区分段呈下降趋势,最高值分布在 $4\text{—}6\text{ m}$ 外,其余林分密度宿留枯枝、枯叶碳密度在 $2\text{—}8\text{ m}$ 区分段呈上升趋势,而在 8 m —树梢区分段呈下降趋势,最高值分布在 $6\text{—}8\text{ m}$ 。鲜枝、鲜叶碳密度随林分密度增加呈先升高后下降的趋势($P<0.05$), M2 密度碳密度最大;从垂直空间角度来看,鲜枝及鲜叶碳密度主要分布于树体中上部;随垂直空间高度增加,同一林分密度鲜叶碳密度均在 $6\text{—}10\text{ m}$ 区分段呈先升高后下降的趋势,最大值出现在 $8\text{—}10\text{ m}$ 区分段;在 10 m —树梢时呈逐渐降低趋势。

表 2 不同林分密度不同高度杉木人工林乔木层各组分生物量、碳含量、碳密度
Table 2 Biomass, carbon content and carbon density of *Cunninghamia lanceolata* plantation with different planting densities and different heights

器官 Organs	高度 Height/m	生物量 Biomass/(t/hm ²)			碳含量 Carbon content/(g/kg)			碳密度 Carbon density/(t/hm ²)		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
宿留枯枝 Persistent withered branches	2—4	0.25±0.01Ab	0.38±0.01Aa	1.15±0.02Ba	484.22±1.11Aa	494.74±3.01Ba	495.64±4.12Ba	0.12±0.01Ab	0.19±0.02Ab	0.59±0.04Ba
	4—6	0.41±0.01Ac	2.64±0.05Cc	1.62±0.02Bb	492.61±1.21Ab	494.24±1.12Aa	499.13±2.54Ba	0.20±0.01Ac	1.29±0.07Bd	0.82±0.04Ab
	6—8	0.56±0.01Ad	1.91±0.01Bb	3.52±0.04Cc	495.65±2.15Ac	489.21±2.84Bb	469.23±5.87Ca	0.47±0.01Ad	0.92±0.02Bc	1.64±0.06Cc
	8—树梢	0.07±0.00Aa	0.18±0.00Aa	3.06±0.03Bc	496.12±1.11Ac	492.12±1.11Aab	502.36±5.84Aa	0.04±0.00Aa	0.09±0.00Aa	1.51±0.07Bc
	总计	1.29±0.03A	5.11±0.07B	9.35±0.11C	492.15±1.40A	492.58±2.02A	491.59±4.59A	0.83±0.03A	2.49±0.11B	4.56±0.21C
宿留枯叶 Persistent withered leaves	2—4	0.05±0.00Aa	0.58±0.01Bb	0.52±0.01Ba	504.25±1.65Aa	533.47±1.93Ba	514.88±2.31ABa	0.07±0.00Aa	0.39±0.09Cb	0.27±0.02Ba
	4—6	0.46±0.01Ab	1.89±0.01Cc	1.18±0.01Bb	522.69±0.98Ab	525.46±1.72Ba	527.69±1.45Ba	0.25±0.01Ab	0.98±0.02Cb	0.63±0.03Bb
	6—8	0.75±0.01Ac	2.22±0.01Bd	3.57±0.03Cc	517.64±1.24Ac	523.94±4.21Ba	533.45±1.10Ca	0.39±0.01Ac	1.16±0.00Bb	1.91±0.06Cc
	8—树梢	0.05±0.00Aa	0.33±0.01Ba	3.26±0.01Cc	521.69±1.11Ad	526.87±2.54Aa	532.21±6.12Aa	0.05±0.00Aa	0.18±0.01Aa	1.73±0.15Bc
	总计	1.31±0.02A	5.02±0.04B	8.53±0.06C	516.57±1.25A	524.62±2.60A	527.06±2.75A	0.76±0.02A	2.71±0.012B	4.54±0.26B
鲜叶 Fresh leaves	6—8	1.79±0.04Aa	3.71±0.02Ba	4.03±0.02Ca	509.21±1.14Aa	498.21±1.11Ba	506.12±1.11Ca	0.86±0.04Aa	1.90±0.09Ba	2.04±0.03Ca
	8—10	2.57±0.01Ab	5.58±0.02Bb	3.32±0.03Ab	506.21±2.14Ab	503.12±1.22Bb	507.21±1.25Aa	1.34±0.07Ab	3.87±0.08Bb	1.70±0.07Bb
	10—树梢		4.96±0.00Ac	2.64±0.02Bc		503.21±1.11Ab	513.69±4.85Bb		2.6±0.04Ac	1.33±0.11Bc
	总计	4.36±0.05A	14.25±0.04B	9.99±0.07C	507.71±1.64A	501.51±3.44A	509.08±2.40A	2.20±0.11A	8.37±0.21B	5.07±0.21C
	6—8	2.32±0.00Aa	3.37±0.02Aa	2.63±0.00Aa	492.55±1.66Aa	483.21±1.21Ba	462.24±1.25Ca	0.97±0.05Aa	1.64±0.05Ba	1.19±0.02Ca
鲜枝 Fresh branches	8—10	2.97±0.00Ab	4.77±0.02Bb	2.29±0.03Cb	487.25±1.21Ab	480.61±1.11Aa	495.34±2.26Ab	1.88±0.05Ab	2.42±0.02Bb	1.09±0.05Ca
	10—树梢		4.72±0.02Ab	1.67±0.02Bc		481.22±4.08Aa	478.59±3.11Bc		2.41±0.03Ab	0.75±0.09Bb
	总计	5.29±0.00A	12.86±0.06B	6.59±0.05C	489.91±1.44A	481.68±2.13A	478.72±2.21A	2.85±0.10A	6.47±0.10B	3.03±0.16A
	0—2	15.60±0.00Af	21.80±0.11Bf	34.23±0.03Cf	495.21±1.51Aa	494.71±2.16Abc	483.42±3.14Ba	7.63±0.01Af	10.87±0.10Bf	16.87±0.26Cf
	2—4	11.25±0.01Ae	15.43±0.07Be	21.22±0.11Ce	493.87±2.54Aab	493.43±3.14Abc	483.94±7.01Ba	5.56±0.01Ae	7.60±0.09Be	10.37±0.15Ce
树干 Trunk	4—6	7.58±0.14Ad	12.67±0.13Bd	16.37±0.12Cd	492.44±2.15Ab	496.14±2.64Ac	478.69±28.41Aa	4.32±0.13Ad	6.30±0.20Bd	7.78±0.09Cd
	6—8	5.24±0.19Ac	7.31±0.13Bc	10.01±0.13Cc	488.47±1.64Ac	487.27±3.43Aa	491.69±2.19Aa	3.26±0.17Ac	4.28±0.17Bc	4.91±0.28Cc
	8—10	3.31±0.01Ab	3.85±0.06ABb	4.07±0.12Bb	490.21±2.14ABc	491.68±2.51Aab	487.61±1.98Ba	1.69±0.01Ab	1.83±0.10Ab	1.89±0.25Ab
	10—树梢	0.61±0.00Ca	0.51±0.02Ba	0.32±0.01Aa	489.28±1.73Ac	488.29±0.98Aa	489.12±1.64Aa	0.61±0.00Ba	0.60±0.02Ba	0.45±0.02Aa
	总计	43.59±0.35A	61.57±0.52B	86.31±0.39C	491.58±1.95A	491.92±2.48A	485.75±7.39A	23.07±0.33A	31.48±0.78B	42.27±1.05C
树皮 Bark	0—2	2.74±0.03Af	4.28±0.01Be	6.95±0.06Cc	472.41±2.54Aab	488.69±1.00Ba	497.54±1.36Ca	1.30±0.05Af	1.99±0.08Be	3.17±0.06Cf
	2—4	2.07±0.08Ae	2.83±0.07Bd	3.78±0.03Cd	476.24±2.39Abc	484.16±1.23Bb	486.95±4.25Ba	1.01±0.07Ae	1.36±0.10Ad	2.16±0.62Be
	4—6	1.77±0.05Ad	2.75±0.01Bd	3.25±0.02Cd	477.12±1.00Ac	478.62±1.18Ac	480.64±1.33Ba	0.84±0.04Ad	1.32±0.02Bd	1.58±0.04Bd
	6—8	1.17±0.07Ac	1.91±0.03Bc	2.51±0.03Cc	475.69±1.28Abc	474.81±1.03AB	473.68±2.31Ba	0.54±0.06Ac	0.93±0.04Bc	1.19±0.06Be
	8—10	0.94±0.03Ab	1.16±0.01Ab	1.69±0.02Bb	472.69±1.98Aab	482.64±1.25Ad	469.35±2.95Aa	0.45±0.03Ab	0.57±0.01Ab	0.54±0.05Ab
总计	10—树梢	0.54±0.00Ba	0.30±0.00Aa	0.31±0.01Aa	471.68±5.14Aa	459.34±1.00Ae	455.63±2.97Aa	0.25±0.00Ba	0.18±0.00Aa	0.14±0.02Aa
	总计	9.23±0.26A	13.23±0.13B	18.49±0.17C	474.31±2.39A	478.04±1.11A	477.29±2.53A	4.39±0.25A	6.35±0.25B	8.78±0.85C

大写字母表示相同高度不同密度间的显著性 ($P<0.05$); 小写字母表示相同密度不同高度间的显著性 ($P<0.05$)

从表 3 可以看出,杉木根系碳密度变化趋势与根系径级、林分密度有关。就不同林分密度而言,根系碳密度体现为: M3 ($10.63/\text{hm}^2$) > M2 ($7.94/\text{hm}^2$) > M1 ($6.64/\text{hm}^2$), 存在显著差异 ($P<0.05$), M3 根系总碳密度比 M1 和 M2 分别提高 37.5%、25.3%。不同径级而言,细根、粗根、根头碳密度随林分密度增加而升高,均存在显著差异 ($P<0.05$); 根头和粗根碳密度占总根系碳密度含量最大,且随林分密度的增加,其占比也逐渐升高,各径级根系之间差异达到显著水平 ($P<0.05$)。

综合表 2 及表 3 不同林分密度杉木人工林生态系统乔木层各器官生物量及碳含量,3 种林分密度各器官碳含量变化范围都很小,除中根和大根随林分密度增加碳含量显著降低外,其余器官均无显著差异;不同器官碳含量表现为宿留枯叶>鲜叶>宿留枯枝>树干>鲜枝>树皮>树根,差异达到显著水平 ($P<0.05$)。乔木层树干、树皮、鲜枝、鲜叶、宿留枯枝、宿留枯叶生物量随林分密度及高度变化而变化的趋势与碳密度相似,3 种林分密度各器官生物量均成显著差异 ($P<0.05$)。树干、树皮、宿留枯枝、宿留枯叶、树根生物量随林分密度的增加而升高,鲜枝、鲜叶生物量均随林分密度增大呈先升高后降低的变化趋势。

2.1.2 林下地被物层碳含量、生物量与碳密度

由表 4 可知, M1、M2、M3 林分林下枯枝落叶碳密度分别为: $1.31/\text{hm}^2$ 、 $1.54/\text{hm}^2$ 、 $1.95/\text{hm}^2$, 随林分密度增大碳密度不断升高, 存在显著差异 ($P<0.05$), 其中 M3 林分碳密度比 M1 和 M2 分别提高 48.85%、26.62%; M1、M2、M3 林分的林下植被碳密度分别为: $1.46/\text{hm}^2$ 、 $0.91/\text{hm}^2$ 、 $0.14/\text{hm}^2$, 随林分密度增大碳密度不断降低, 存在显著差异 ($P<0.05$), 其中 M1 是 M3 的 10.43 倍。

林下地被物碳含量在 $391.25\sim 468.24\text{ g/kg}$ 。随着林分密度的增加, 林下植被碳含量逐渐下降, 存在显著差异 ($P<0.05$)。凋落物生物量随林分密度增大逐渐升高, 林下植被生物量随林分密度增大逐渐降低, 都存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.1.3 土壤层碳含量与碳密度

由图 1 可知, 不同林分密度杉木林土壤层碳含量为 $8.07\sim 22.4\text{ g/kg}$, 同一土层不同密度林分间碳含量不存在显著差异 ($P>0.05$)。不同林分密度杉木林土壤层碳含量具有明显垂直分布特征。M1、M2、M3 土壤各层单位厚度的平均碳含量均随土层深度的增加而逐渐降低, 表层 ($0\sim 20\text{ cm}$) 土壤碳含量最高, 分别为 19.1 、 22.4 和 20.07 g/kg , 显著高于 $20\sim 40$ 、 $40\sim 60\text{ cm}$ 土层, 随着土层深度的继续增加, 土壤碳含量继续下降, 但不同土层间差异逐渐减小。

从图 2 可以看出, 各密度下土壤碳密度分别为 $88.63/\text{hm}^2$ 、 $93.17/\text{hm}^2$ 、 $91.72/\text{hm}^2$, 各土层碳密度差异不显著 ($P>0.05$)。M1、M2、M3 土壤各层单位厚度的平均碳密度均随土层深度的增加而逐渐降低, 以 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层的碳密度最大, $20\sim 40\text{ cm}$ 土层碳密度下降迅速, $40\sim 60\text{ cm}$ 趋于平缓。 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层碳密度占土壤

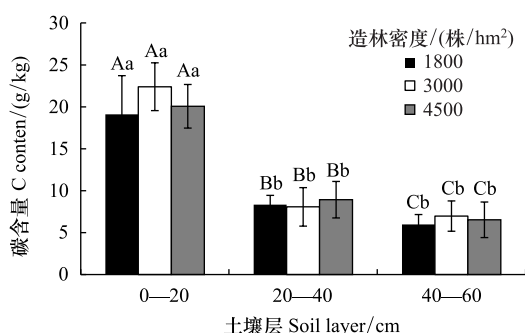


图 1 不同造林密度杉木人工林土壤层碳含量/(g/kg)

Fig.1 Carbon content in soil layer of *Cunninghamia lanceolata* plantation with different planting densities

大写字母表示相同土层不同密度间的显著性 ($P<0.05$); 小写字母表示相同密度不同土层间的显著性 ($P<0.05$)

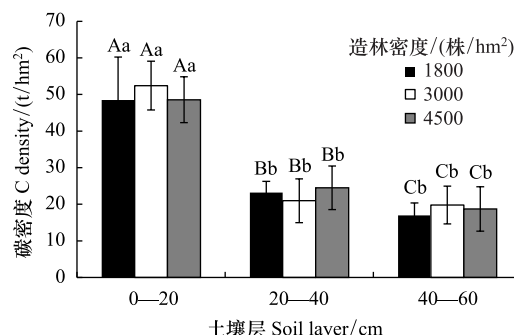


图 2 不同造林密度杉木人工林土壤碳密度/(t/hm²)

Fig.2 Soil carbon density of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different planting densities

大写字母表示相同土层不同密度间的显著性 ($P<0.05$); 小写字母表示相同密度不同土层间的显著性 ($P<0.05$)

表 3 不同林分密度杉木人工林不同径级根系生物量、碳含量、碳密度
Table 3 Root biomass, carbon content and carbon density of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different planting densities

器官 Organs	径级 Diameter class	生物量 Biomass/(t/hm ²)			碳含量 Carbon content/(g/kg)			碳密度 Carbon density/(t/hm ²)		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
树根 Root	细根	0.66±0.02Aa	0.96±0.06Ba	1.26±0.04Ca	404.93±6.31Aa	405.32±2.15Aa	333.21±1.05Aa	0.27±0.01Aa	0.39±0.02Ba	0.50±0.01Ca
	小根	1.05±0.04Ab	1.47±0.12Bb	1.43±0.20Ba	457.24±5.23Ab	434.25±3.26Bb	434.28±5.17Bb	0.48±0.02Aa	0.67±0.06Bb	0.62±0.01Bb
	中根	2.44±0.03Ac	2.4±0.06Ac	3.97±0.03Bb	453.61±4.36Ab	446.39±3.12Bc	270.39±2.14Cc	1.11±0.02Ab	1.07±0.02Ac	1.07±0.01Ac
	大根	2.04±0.02Ad	2.37±0.18Bc	3.16±0.04Cc	479.34±5.19Ac	470.81±4.12Ad	286.34±6.37Bd	0.98±0.02Ab	1.12±0.08Bc	0.91±0.02Ac
	粗根	2.05±0.12Ad	2.97±0.09Bd	6.66±0.12Cd	473.12±2.31Ac	471.39±3.27Ad	479.36±6.85Be	0.97±0.06Ac	1.40±0.05Bd	3.19±0.06Cd
根头		5.78±0.06Ae	6.84±0.36Be	8.82±0.20Ce	492.28±2.06Ad	486.21±1.10Be	492.81±1.08Af	2.84±0.03Ad	3.33±0.18Be	4.34±0.11Ce
	总计	14.01±0.30A	17.01±0.87B	25.3±0.45C	460.09±4.2A	452.48±2.80A	382.73±3.72B	6.64±0.15A	7.94±0.40B	10.63±0.22C

大写字母表示不同密度间的显著性($P<0.05$);小写字母表示相同密度不同径级间的显著性($P<0.05$)

表 4 不同林分密度杉木人工林林下地被物生物量、碳含量、碳密度
Table 4 Biomass, carbon content and carbon density of different understory of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different planting densities

组分 Component	生物量 Biomass/(t/hm ²)			碳含量 Carbon content/(g/kg)			碳密度 Carbon density/(t/hm ²)		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
凋落物 Litter	2.84±0.06A	3.29±0.06B	4.22±0.03C	462.03±3.11A	468.24±0.62B	462.84±4.82A	1.31±0.02A	1.54±0.03B	1.95±0.04C
林下植被 Undergrowth vegetation	3.47±0.02A	2.19±0.04B	0.36±0.03C	422.69±2.48A	413.68±2.84B	391.25±5.13C	1.46±0.004A	0.90±0.02B	0.14±0.01C
总计 Total	6.31±0.08A	5.48±0.1B	4.58±0.06C	442.36±2.80A	440.96±1.73A	427.04±4.98B	2.78±0.024A	2.44±0.05B	2.09±0.05C

大写字母表示不同密度间的显著性($P<0.05$)

碳密度的 52.9%—56.26%,占比最大。

2.2 不同密度杉木林生态系统碳密度分配特征

由表 5 可知 M1、M2、M3 杉木人工林总碳密度分别为:131.54 t/hm²、161.42 t/hm²、172.69 t/hm²,变化规律为: M3>M2>M1,且存在显著差异($P<0.05$)。因此可知,适当的增加林分密度,林分的总碳密度会不断增加。杉木林生态系统碳密度分配序列为土壤层>乔木层>林下地被物层。土壤碳密度占比最大,约占杉木人工林生态系统总碳密度的 53.11%—67.37%,其次是树干,约占 17.54%—24.48%,其余生物体碳密度占比 10.21%—29.88%。碳在杉木林生态系统的分配差异明显,土壤、树干与其他生物体差异显著($P<0.05$)。随密度升高,树干、树皮、宿留枯枝、宿留枯叶、树根碳密度占比逐渐升高,土壤、鲜叶、林下植被碳密度占比逐渐降低,鲜枝和凋落物碳密度占比保持稳定。

表 5 不同林分密度杉木人工林生态系统碳密度分配表

Table 5 Carbon density distribution Table of <i>Cunninghamia lanceolate</i> plantation ecosystem with different planting densities							
组分 Component		林分密度 Planting density/(株/hm ²)					
		M1		M2		M3	
		碳密度 Carbondensity/ (t/hm ²)	分配比例 Distribution ratio/%	碳密度 Carbon density/ (t/hm ²)	分配比例 Distribution ratio/%	碳密度 Carbon density/ (t/hm ²)	分配比例 Distribution ratio/%
乔木层 Tree layer	树干	23.07±0.33	17.54±0.25	31.48±0.78	19.50±0.48	42.27±1.05	24.48±0.61
	树皮	4.39±0.25	3.30±0.20	6.35±0.25	3.93±0.15	8.78±0.85	5.10±0.49
	宿留枯枝	0.83±0.03	0.63±0.02	2.49±0.11	1.54±0.07	4.56±0.21	2.64±0.12
	宿留枯叶	0.76±0.02	0.58±0.02	2.71±0.01	1.68±0.04	4.54±0.26	2.63±0.15
	鲜枝	2.20±0.11	1.67±0.08	8.37±0.21	5.19±0.13	5.07±0.21	2.94±0.12
	鲜叶	2.85±0.10	2.17±0.08	6.47±0.10	4.01±0.06	3.03±0.16	1.75±0.09
	树根	6.64±0.15	5.05±0.11	7.94±0.40	4.92±0.25	10.63±0.22	6.16±0.13
	总计	40.14±0.99	30.52±0.75	65.81±1.87	40.77±1.15	78.88±2.96	45.68±1.71
林下地被物层 Understory layer	凋落物	1.31±0.02	1.00±0.02	1.54±0.03	0.96±0.02	1.95±0.04	1.13±0.02
	林下植被	1.46±0.00	1.11±0.00	0.90±0.018	0.56±0.01	0.14±0.01	0.08±0.01
	总计	2.78±0.02	2.11±0.02	2.44±0.05	1.50±0.03	2.09±0.05	1.21±0.03
土壤层 Soil layer	总计	88.62±18.16	67.37±13.80	93.17±17.80	57.72±11.03	91.72±18.29	53.11±10.59

2.3 杉木人工林生态系统各组分与林分密度相关性

由表 6 可知,树干、树皮、宿留枯枝碳密度与林分密度均呈极显著正相关,宿留枯叶、鲜枝、鲜叶、树根、凋落物、林下植被碳密度与林分密度均无显著相关关系。

3 结论与讨论

在适宜的林分密度调控下,研究碳密度是确定人工林活力和健康的关键因子^[21—22]。关于不同密度杉木人工林生态系统碳密度和分配特征,本研究结果表明:乔木层,树干、树皮、宿留枯枝枯叶碳密度随林分密度增大而升高,存在显著差异($P<0.05$);鲜枝鲜叶碳密度随林分密度增大先升高后降低,存在显著差异($P<0.05$)。合理的密度调控可以提高杉木林林分生产力^[23],故随着林分密度增加,林分单位面积生产力增加,树干、树皮、宿留枯枝枯叶所储存的有机碳也增加。这与王秀云等^[24]研究结果一致。过高的林分密度导致林分营养空间减少^[13],不利于鲜枝、鲜叶的生长,且残留在树干的宿留枯枝、宿留枯叶较多。从垂直空间角度来看,树干和树皮由于中下部生长时间更长,所储存的碳更多,其碳密度随高度升高而降低。宿留枯枝枯叶碳密度主要集中在 4—8m,这是由于树体中部残留的宿留枯枝枯叶较多。鲜枝鲜叶碳密度主要分布于树体中上部,因其不受遮挡,能够更好的吸收阳光进行光合作用。同一林分密度,不同径级根系碳含量具有差异性,可能是由于不同径级根系具有不同的生长规律。不同径级根碳密度都随着林分密度的增大而升高,且具有显著差异

($P<0.05$)。M3 根系碳密度比 M1、M2 提高很多,说明林分密度对杉木根系碳密度的影响很大,根头和粗根碳密度占比最大,随着林分密度增加其占比也在增加。变化规律与不同径级根生物量变化规律相似。研究发现,各组分碳密度变化与生物量变化相似,植物体碳密度与生物量有很强的相关性,可以通过控制林分密度来调节森林的生物量生产来提高生态系统碳密度^[25-26]。

表 6 杉木人工林各组分碳密度与林分密度相关性分析

Table 6 Correlation analysis between carbon density of each component and planting density of *Cunninghamia lanceolata* plantation

	林分密度 Planting density	树干 Trunk	树皮 Bark	宿留枯枝 Stay dead branches	宿留枯叶 Stay dead leaves	鲜枝 Fresh branches	鲜叶 Fresh leaves	树根 Root	凋落物 Litter	林下植被 Undergrowth vegetation
林分密度	1									
树干	1.000 **	1								
树皮	1.000 **	1.000 **	1							
宿留枯枝	1.000 **	1.000 **	1.000 **	1						
宿留枯叶	0.997	0.996	0.997	0.997	1					
鲜枝	0.407	0.400	0.409	0.408	0.481	1				
鲜叶	-0.020	-0.027	-0.018	-0.019	0.062	0.905	1			
树根	0.991	0.992	0.991	0.991	0.977	0.281	-0.154	1		
凋落物	0.995	0.996	0.995	0.995	0.984	0.317	-0.117	0.999 *	1	
林下植被	-1.000 *	-1.000 *	-1.000 *	-1.000 *	-0.994	-0.386	0.04311	-0.9938	-0.997 *	1

* * 表示极显著 ($P<0.01$), * 表示显著 ($P<0.05$)

林下地被物层,林下植被碳密度呈随林分密度增大而降低的变化趋势,存在显著差异 ($P<0.05$)。凋落物与其相反。这可能是由于较高的林分密度,使林分透光率降低,温度降低,不利于林下植被生长更新,生物量减少,导致林下植被碳密度降低。凋落物的生物量增加且分解速率变慢,使得其碳密度升高。这与刁娇娇、徐扬等^[27-28]研究结果一致。虽然林下地被物层在生态系统中生物量占比较小,但林下植被的减少会对凋落物分解产生抑制^[29],它在林分生态系统养分循环中占有重要地位,因此在提高林分碳吸存能力的时候要合理保护林下地被物层^[30]。

凋落物分解是土壤有机碳的主要来源之一。林分密度对土壤层碳密度不具显著差异,原因可能是随着林分密度的增加,凋落物量增多^[31];同时,随着林分密度增加,林内光照强度减弱,土层温度降低,林木根系密度和土壤生物活性降低,凋落物分解速率变慢,土壤有机碳输入减少^[32-33]。正是由于上述两种生物过程的中和作用,导致不同密度杉木林土壤层碳密度差异不显著,这与殷博^[4]等结果相似。各土层单位厚度的平均碳密度均随土层深度的增加而逐渐降低,表层有机碳密度最高,说明根系对土壤有机碳的输入及生物积累作用影响大,随表层土壤的加深,林木根系会大幅减少^[34-35]。

杉木林生态系统碳密度土壤层>乔木层>林下地被物层。在森林生态系统中,土壤层和乔木层碳密度占比最大,达到 95%以上^[11]。土壤碳密度占生态系统碳密度 53%以上,林分密度的改变能改变乔木层各器官生物量和碳密度的分配情况^[36],树干、树皮和树根碳密度占比随林分密度的增加而升高,树干、树皮和树根对于植物器官的碳储存来说起着重要作用。随着林分密度的增加,杉木林生态系统总碳密度不断升高,方晰^[37]等通过研究分析湿地松碳储量,得出生态系统植被、枯落物碳储量均随林分密度的增大而升高的结论,与本研究结果与其相似。所得结果对森林经营具有一定的现实意义,优化林分密度管理不会损害杉木林高碳积累。

林业是一个培育周期较长的行业。随着林分的生长发育,人工林生态系统各组分生物量、碳含量及碳密度也会发生变化。本研究仅研究了 12 年生不同林分密度杉木林生态系统各组分生物量、碳含量及碳密度的变化及分配规律,随着该试验林的生长发育,今后生物量、碳含量及碳密度的变化趋势有待于进一步的跟踪监测。

参考文献 (References):

- [1] Pan P, Sun Y J, Ouyang X Z, Zang H, Rao J F, Ning J K. Factors affecting spatial variation in vegetation carbon density in *Pinus massoniana*

- Lamb. forest in subtropical China. *Forests*, 2019, 10(10): 880.
- [2] 冯源, 田宇, 朱建华, 肖文发, 李奇. 森林固碳释氧服务价值与异养呼吸损失量评估. *生态学报*, 2020, 40(14): 5044-5054.
- [3] 胡会峰, 刘国华. 森林管理在全球 CO₂ 减排中的作用. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 709-714.
- [4] 殷博, 董鹏飞, 党坤良. 抚育间伐对红桦林生态系统碳密度的影响. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 105-112.
- [5] 沈彪, 党坤良, 武朋辉, 朱成功. 秦岭中段南坡油松林生态系统碳密度. *生态学报*, 2015, 35(6): 1798-1806.
- [6] 牛春梅, 关晋宏, 程然然, 李国庆, 吴春荣, 程积民, 杜盛. 黄土高原中西部刺槐人工林生态系统碳密度及其影响因子. *生态学报*, 2017, 37(15): 5049-5058.
- [7] 那萌, 刘婷岩, 张彦东, 冯晨辛, 刘道锟. 林分密度对水曲柳人工林碳储量的影响. *北京林业大学学报*, 2017, 39(1): 20-26.
- [8] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson D W, Minkinen K, Byrne K A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 253-268.
- [9] 贾亚运, 何宗明, 周丽丽, 马祥庆, 吴鹏飞, 邹显花, 刘青青, 刘雨晖. 造林密度对杉木幼林生长及空间利用的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1177-1181.
- [10] 卢立华, 农友, 李华, 曾冀, 孙冬婧, 陈琳, 明安刚, 杨予静. 保留密度对杉木人工林生长和生物量及经济效益的影响. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 717-724.
- [11] Noh N J, Kim C, Bae S W, Lee W K, Yoon T K, Muraoka H, Son Y. Carbon and nitrogen dynamics in a *Pinus densiflora* forest with low and high stand densities. *Journal of Plant Ecology*, 2013, 6(5): 368-379.
- [12] 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. *西北林学院学报*, 2016, 31(3): 197-203.
- [13] 李瑞霞, 郝俊鹏, 闵建刚, 陈信力, 卢雯, 关庆伟. 不同密度侧柏人工林碳储量变化及其机理初探. *生态环境学报*, 2012, 21(8): 1392-1397.
- [14] Selvaraj S, Duraisamy V, Huang Z J, Guo F T, Ma X Q. Influence of long-term successive rotations and stand age of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations on soil properties. *Geoderma*, 2017, 306(5): 127-134.
- [15] Duan H J, Cao S, Zheng H Q, Hu D H, Lin J, Lin Z H, Hu R Y, Sun Y H, Li Y. Variation in the growth traits and wood properties of Chinese fir from six provinces of southern China. *Forests*, 2016, 7(9): 192.
- [16] 姚利辉, 康文星, 赵仲辉, 何介南. 会同杉木人工林不同生长阶段植物固碳特征. *生态学报*, 2015, 35(4): 1187-1197.
- [17] 梁萌杰, 陈龙池, 汪思龙. 湖南省杉木人工林生态系统碳储量分配格局及固碳潜力. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 896-902.
- [18] 尉海东, 刘爱琴, 马祥庆, 林开敏, 范少辉. 连栽对杉木人工林碳贮量的影响研究. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 36-39.
- [19] 张艳杰, 温佐吾. 不同造林密度马尾松人工林的根系生物量. *林业科学*, 2011, 47(3): 75-81.
- [20] 王成, 金永焕, 刘继生, 金玉善, 金春德, 李英洙. 延边地区天然赤松林单木根系生物量的研究. *北京林业大学学报*, 1999, 21(1): 44-49.
- [21] Luxmoore R J, Tharp M L, Post W M. Simulated biomass and soil carbon of loblolly pine and cottonwood plantations across a thermal gradient in southeastern United States. *Forest Ecology and Management. Forest Ecology and Management*, 2008, 254(2): 291-299.
- [22] Rizvi R H, Dhyan S K, Yadav R S, Singh R. Biomass production and carbon stock of poplar agroforestry systems in Yamunanagar and Saharanpur districts of northwestern India. *Current Science*, 2011, 100(5): 736-742.
- [23] 张水松, 陈长发, 吴克选, 占有生, 何寿庆. 杉木林间伐强度试验 20 年生长效应的研究. *林业科学*, 2005, 41(5): 56-65.
- [24] 王秀云, 孙玉军, 马炜. 不同密度长白落叶松林生物量与碳储量分布特征. *福建林学院学报*, 2011, 31(3): 221-226.
- [25] Węgie A, Polowy K. Aboveground carbon content and storage in mature Scots pine stands of different densities. *Forests*, 2020, 11(2): 240.
- [26] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 熊彩云, 张池, 刘素萍, 张剑. 毛竹 (*Phyllostachy pubescens*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林生态系统碳贮量及其分配特征. *生态学报*, 2007, 27(7): 2794-2801.
- [27] 刁娇娇, 肖文娅, 费菲, 关庆伟, 陈斌. 间伐对杉木人工林生长及生态系统碳储量的短期影响. *西南林业大学学报*, 2017, 37(3): 134-139.
- [28] 徐扬, 刘勇, 李国雷, 郭蓓, 李瑞生. 间伐强度对油松中龄人工林林下植被多样性的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(3): 135-138.
- [29] 李媛良, 汪思龙, 颜绍廴. 杉木人工林剔除林下植被对凋落层养分循环的短期影响. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2560-2566.
- [30] 陈东升, 孙晓梅, 张守攻. 不同年龄日本落叶松人工林生物量、碳储量及养分特征. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3759-3768.
- [31] 王晓峰, 汪思龙, 张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物生物量碳的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2393-2398.
- [32] 方晰, 田大伦, 项文化. 间伐对杉木人工林生态系统碳贮量及其空间分配格局的影响. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(11): 47-53.
- [33] 向元彬, 胡庭兴, 张健, 涂利华, 李仁洪, 雒守华, 黄立华, 戴洪忠. 华西雨屏区不同密度巨桉人工林土壤呼吸特征. *自然资源学报*, 2011, 26(1): 79-88.
- [34] 卢立华, 郭文福, 蔡道雄, 贾宏炎, 陈琳, 农友, 雷丽群, 李华, 刘士玲, 杨保国. 马尾松与红椎纯林及混交林生态系统碳储量研究. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(7): 78-84.
- [35] 韩畅, 宋敏, 杜虎, 曾履平, 彭晚霞, 王华, 陈莉, 苏樑. 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. *生态学报*, 2017, 37(7): 2282-2289.
- [36] 黄雪蔓, 尤业明, 蓝嘉川, 刘世荣, 贾宏炎, 朱宏光, 温远光. 不同间伐强度对杉木人工林碳储量及其分配的影响. *生态学报*, 2016, 36(1): 156-163.
- [37] 方晰, 田大伦, 项文化, 蔡宝玉. 不同密度湿地松人工林中碳的积累与分配. *浙江林学院学报*, 2003, 20(4): 374-379.