

陇东地区油松人工林碳密度及其影响因素

曹旭平¹, 申家朋², 张文辉², 张辉³

(1. 延安市乔山林业局, 陕西 黄陵 727300; 2. 西北农林科技大学 西部环境与生态教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西省咸阳市市长武县林业规划设计队, 陕西 咸阳 712000)

摘要: [目的] 分析陇东地区人工林碳密度及其影响因素, 为黄土丘陵区生态环境评价提供理论依据。[方法] 采用样地调查与生物量实测方法, 对陇东地区油松人工林碳密度进行了估算, 并分析生态因素对油松人工林生态系统碳密度的影响。[结果] 油松林各器官碳含量变化范围为 48.58%~53.54%, 各器官碳密度按从高到低的大小顺序依次为: 树干>树枝>树根>树叶>树皮>果实; 灌木层叶、茎、根的碳含量分别为 43.93%, 45.62%, 42.38%; 草本层地上部分和地下部分碳含量为 43.04%, 39.77%; 枯落物层未分解和半分解层碳含量为 43.79%, 38.83%; 植被层碳密度按从高到底的大小顺序为: 乔木层>草本层>灌木层。土壤层(0—100 cm)碳含量随着土壤深度的增加而降低, 且不同土壤层碳密度存在显著差异, 以 50—100 cm 碳密度最高。油松林生态系统平均碳密度为 52.86 t/hm², 其空间分布排序为土壤层(75.15%)>植被层(24.14%)>枯落物层(0.71%)。[结论] 油松人工林生态因子中, 林分平均树高、平均胸径、郁闭度均与各层碳密度呈现极显著正相关性, 林分枯落物未分解干质量与各层碳密度呈现显著正相关性。平均树高、平均胸径、郁闭度、枯落物未分解干质量是油松人工林生态系统碳密度的主要生态因子。
关键词: 陇东地区; 油松人工林; 碳密度; 生态因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0359-06

中图分类号: S718.5

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.069

Carbon Density and Its Influence Factors of *Pinus Tabulaeformis* Plantation in Longdong Area

CAO Xuping¹, SHEN Jiapeng², ZHANG Wenhui², ZHANG Hui³

(1. Qiaoshan Forest Bureau of Yan'an City, Huangling, Shaanxi

727300, China; 2. Key Laboratory of Environment and Ecology of Education

Ministry in West China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Forestry Planning Design Team of Changwu County, Shaanxi Province, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: [Objective] To analyze the carbon density of *Pinus tabulaeformis* and its influence factors in Longdong area in order to provide theoretical basis for the evaluation of the ecological environment of the loess hilly region. [Methods] The carbon density of *Pinus tabulaeformis* was estimated and the influence of ecological factors on carbon density was discussed by the methods of plot investigation and biomass measurement. [Results] The carbon content in different organs of *P. tabulaeformis* ranged from 48.58% to 53.54%, and the average carbon density decreased in the order of stem>branch>root>leaf>cone. The carbon content of leaf, branch, and root in shrub was 43.93%, 45.62% and 42.38%, respectively. The carbon content of above-ground and below-ground in herb was 43.04% and 39.77%. The carbon content of fresh litter and decomposing litter was 43.79% and 38.83%. The carbon density of vegetation layer decreased in the order of tree layer>herb layer>shrub layer. The average carbon content in the soil layer (0—100 cm) decreased gradually with the increase of soil depth, and the carbon density had significant difference in different layers, and that in 50—100 cm soil was the highest layer. The total carbon density of *P. tabulaeformis* ecosystem was 52.86 t/hm², and the vertical distribution were: soil layer(75.15%)>vegetation layer(24.14%)>litter layer(0.71%). [Conclusion] Ecological factors including average tree height, average diameter at breast

收稿日期: 2014-04-01

修回日期: 2014-04-15

资助项目: 中国科学院战略先导科技专项“退耕还林(草)工程固碳速率和潜力研究”(XDA05060300)

第一作者: 曹旭平(1963—), 男(汉族), 陕西省宜川县人, 高级工程师, 主要从事森林生态和森林经营管理研究。E-mail: 2408192165@qq.com。

通信作者: 张文辉(1954—), 男(汉族), 陕西省岐山县人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事森林培育、生物多样性保护与利用研究。E-mail: zwhckh@163.com。

height and canopy density showed highly significant correlation with the carbon density of different layers of *P. tabulaeformis* plantation, and undecomposed litter dry mass showed significant correlation with it. The average tree height, average diameter at breast height, canopy density, and undecomposed litter dry mass were primary factors on the carbon density of *P. tabulaeformis* ecosystem.

Keywords: Longdong area; *Pinus tabulaeformis* plantation; carbon density; ecological factors

CO₂ 引起的气候变暖,已成为全球气候变化的热点问题之一^[1-2]。森林作为陆地生态系统的主体,每年固定的碳约占整个陆地生态系统的 60% 以上,在 CO₂ 收支平衡、缓解气候变化以及维持全球气候环境方面起着不可替代的作用^[3-5]。人工林碳效益是新增碳汇的重要途径,因此,通过造林和再造林增加陆地森林生态系统碳汇效益,是目前科学研究的热点^[6-7]。中国是世界人工林面积最大的国家^[8],开展人工林碳密度及其效益的探究,对中国应对国际间碳效益评价、碳谈判、碳交易等具有重要意义。

油松(*Pinus tabulaeformis*)耐干旱、适应能力强,是中国暖温带地区重要的造林树种,也是黄土丘陵沟壑区退耕还林工程主要的造林树种之一^[9-10]。此前,有关油松人工林碳密度的研究多集中于不同年龄、不同区域的分布^[11-13],退耕还林地油松人工林碳密度及其相关影响生态因素的研究相对较少。陇东地区自甘肃省实施退耕还林工程以来,油松人工林面积得到较大提高,在发挥保持水土和生态防护功能的同时,该地区人工林碳汇效益也亟需进行科学的评价。本文对陇东地区退耕还林地油松人工林生物量、碳含量和碳密度及其生态因素进行研究,旨在了解油松人工林生态系统碳密度及其对生境条件的适应特性,分析碳密度的大小分布及影响因素,以期科学评价油松人工林碳密度提供基础数据,并为人工林碳汇提供有效参考。

1 试验材料与方法

1.1 研究区域概况

陇东地区介于东经 106° 20′—108° 45′,北纬 35° 15′—37° 10′,位于甘肃省最东部,海拔高度为 1 100~1 500 m,年平均温度为 7.4 °C,年平均降水量 587.6 mm,属于暖温带半干旱气候,土壤为黄绵土。研究区域设在陇东地区合水县,属黄土丘陵沟壑区,该区域经过甘肃省退耕还林工程建设等措施,基本实现生态系统退化的恢复。

1.2 样地选区和样地调查

2012 年 8 月,在合水县选择造林背景相同(造林前为坡耕地)的 3 种退耕年限油松人工林,即退耕年限 6 a、退耕 9 a 和退耕 12 a 的油松人工林,其造林规划设计采用统一的标准,结合当地植树造林记录和计

数样芯的年轮确定油松人工林的林龄,样地概况见表 1。3 种退耕年限林分别在阳坡和阴坡设置 3 个重复样地(面积 20 m×20 m),共设置 18 个标准地。

表 1 样地基本情况

退耕年限	样地数	海拔/m	坡度/(°)	坡向
6 a	3	1 362	23	阳坡
	3	1 352	22	阴坡
9 a	3	1 237	17	阳坡
	3	1 177	19	阴坡
12 a	3	1 216	16	阳坡
	3	1 054	18	阴坡

1.2.1 人工林生物量的测定

(1) 乔木层生物量的测定。采用陆地生物群落典型样方调查方法^[14]进行,在所选标准地内每木检尺。根据每木检尺结果共确定 18 株标准木,将标准木伐倒,实测伐倒标准木的树干、树枝、树叶、树皮、树根、果实^[15],根据各器官生物量建立异速生长模型^[16-18],推算乔木层生物量,回归方程见表 2。

(2) 林下植被生物量及枯落物的测定。在每个样地设置 3 个 5 m×5 m 的灌木样方和 5 个 1 m×1 m 草本样方,林下灌草采用收获法测定灌木(根、茎、叶)、草本(地上部分、地下部分)生物量,同时将草本样方内的枯落物(未分解层、半分解层)全部收集,分别称鲜重并取样带回实验室,计算单位面积生物量。

表 2 油松各器官生物量(W)与胸径(D)、树高(H)的相对生长方程

组分	生长方程	R ²
树根	$\ln W = -0.985 + 0.322 \ln(D^2 H)$	0.962
树皮	$\ln W = -3.140 + 0.55 \ln(D^2 H)$	0.987
球果	$\ln W = -4.059 + 0.579 \ln(D^2 H)$	0.975
树干	$\ln W = -0.173 + 0.309 \ln(D^2 H)$	0.982
树枝	$\ln W = -0.078 + 0.199 \ln(D^2 H)$	0.964
树叶	$\ln W = -1.954 + 0.351 \ln(D^2 H)$	0.994

1.2.2 土壤采集和室内分析 在每块样地内沿对角线方向设置 5 个土壤采样点,取样深度为 100 cm,按照 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm, 50—100 cm 共分为 5 层,将同一层次土壤样品按质

量比混合取样,并用环刀法测定土壤容重。

将采集到的乔木各器官(树干、树枝、树叶、树皮、树根、果实)、林下植被层(灌木根、灌木茎、灌木叶、草本地上部分、草本地下部分)、枯落物层(未分解层、半分解层)样品,烘干过筛;土壤层(0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm, 50—100 cm)自然风干过筛。所有植物和土壤样品过筛后均采用元素分析仪 LiquiTOC II (德国生产)分析测定有机碳含量。

1.3 油松人工林碳密度的计算

乔木层、林下植被层、枯落物层碳密度根据单位面积生物量乘以不同器官碳含量得到^[19]。土壤碳密度计算方公式^[20]:

$$T = 0.1 \sum C_i \times B_i \times D_i \quad (1)$$

式中: T ——土壤有机碳密度(t/hm^2); i ——土层数; D_i ——不同土层的厚度(cm); B_i ——土壤容重(g/cm^3); C_i ——不同土层土壤有机碳的含量(g/kg)。

1.4 数据处理

所有数据经过 Excel 软件处理后,用 SPSS13.0

软件进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA),Duncan 新复极差法进行差异显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同退耕年限主要生态因子比较

不同退耕年限油松人工林的生态因子有较大差异(见表 3),阳坡和阴坡退耕 12 a 枯落物未分解干质量约是退耕 9 a 的 1.35~1.72 倍,是退耕 6 a 的 2.12~2.75 倍。土壤含水量、土壤密度阴坡要高于阳坡,且同一退耕年限差异不显著,不同退耕年限间差异显著。土壤 pH 值总体差异不显著,说明随着退耕年限变化,pH 值变化影响不明显。灌木、草本盖度阴坡要高于阳坡,随着退耕年限的变化表现差异显著。林分平均树高、平均胸径阴坡要显著高于阳坡,且不同退耕年限间差异显著。林分密度随着退耕年限增加而逐渐减少。郁闭度随着退耕年限的增加而逐渐增大。

表 3 油松人工林不同退耕年限主要生态因子

生态因子	阳坡			阴坡		
	退耕 6 a	退耕 9 a	退耕 12 a	退耕 6 a	退耕 9 a	退耕 12 a
枯落物未分解质量/ $(g \cdot m^{-2})$	33.32±9.34 ^c	67.69±13.87 ^b	91.69±11.19 ^a	44.43±10.38 ^c	54.47±11.17 ^b	94.23±13.91 ^a
枯落物半分解质量/ $(g \cdot m^{-2})$	33.48±8.04 ^{ab}	21.94±7.78 ^c	18.96±8.17 ^c	21.70±6.22 ^{bc}	39.07±7.86 ^a	42.80±7.04 ^a
土壤含水量/%	9.47±3.54 ^c	10.02±4.18 ^b	11.04±4.45 ^a	9.49±3.87 ^c	10.50±3.29 ^{ab}	11.43±4.01 ^b
土壤密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	1.21±0.34 ^c	1.24±0.26 ^b	1.29±0.32 ^a	1.22±0.28 ^{bc}	1.24±0.29 ^b	1.31±0.35 ^a
土壤 pH 值	7.09±0.76 ^b	7.12±0.49 ^{ab}	7.13±0.65 ^a	7.12±0.71 ^{ab}	7.14±0.49 ^a	7.13±0.68 ^a
灌木层盖度/%	13.45±2.43 ^c	16.32±4.51 ^b	21.73±2.18 ^a	13.71±3.27 ^c	19.57±3.65 ^{ab}	22.27±3.88 ^a
草本层盖度/%	45.25±3.32 ^c	43.28±4.14 ^c	49.33±2.07 ^{ab}	48.92±5.52 ^b	48.41±3.19 ^b	52.63±4.76 ^a
平均树高/m	2.01±0.66 ^e	3.19±0.69 ^{cd}	4.17±0.82 ^b	2.54±0.49 ^d	3.76±0.62 ^c	5.21±0.73 ^a
平均胸径/cm	2.05±0.31 ^f	4.17±0.82 ^d	5.63±0.48 ^b	2.83±0.53 ^e	4.81±0.55 ^c	6.92±0.74 ^a
林分密度/ $(株 \cdot hm^{-2})$	2953±25 ^b	2911±56 ^{bc}	2883±61 ^c	3008±33 ^a	2985±79 ^{ab}	2951±42 ^b
郁闭度	0.43±0.04 ^c	0.49±0.04 ^{bc}	0.55±0.05 ^b	0.45±0.03 ^c	0.54±0.05 ^b	0.62±0.06 ^a

注:同行不同上标小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 生态系统不同层次碳含量

2.2.1 乔木层碳含量 油松不同器官碳含量各异,平均碳含量波动范围为:48.58%~53.54%。其中,树干的碳含量最高,为 53.54%,其次为树叶,碳含量为 53.09%,果实碳含量最低,为 48.58%。各器官碳含量存在差异显著,按从高到低的大小顺序依次为:树干>树叶>树枝>树皮>树根>果实(表 4)。

2.2.2 林下植被、枯落物层及土壤层碳含量 林下植被中灌木层碳含量变化范围为 42.38%~45.62%,各器官平均碳含量大小顺序依次为:茎>叶>根;草本层平均碳含量大小顺序为:地上部分>地下部分。林下植被层中均以地下根部碳含量最低。枯落物层的平均碳含量大小顺序依次为:未分解层>半分解层(表 5)。

表 4 油松不同器官碳素含量

器官	树枝	树干	树叶	树根	树皮	果实
碳含量/%	51.77±0.39 ^b	53.54±0.47 ^a	53.09±0.84 ^a	50.16±0.52 ^c	50.84±0.75 ^c	48.58±0.74 ^d

表 5 林下植被和枯落物层碳含量

层次	组分	碳含量/%
灌木层	叶	43.93±0.49
	茎	45.62±0.91
	根	42.38±0.21
草本层	地上部分	43.04±0.33
	地下部分	39.77±0.58
枯落物层	未分解	43.79±0.38
	半分解	38.83±0.61

土壤碳含量随着土壤深度的增加而呈现降低趋势,0—10 cm 土壤层的碳含量为 7.83%,至 10—20 cm 土壤层的碳含量为 5.08%,降幅 35.12%;至 50—100 cm 土壤层的碳含量为 2.29%,降幅 70.75%。0—10 cm,10—20 cm 土壤层差异显著,其余各层间差异不显著(表 6)。

2.3 生态系统不同层次碳密度

测定结果表明:油松人工林乔木层各器官间碳密度存在显著差异,树干的碳密度最高,占乔木层碳密度的 39%;其次为树枝碳密度,占乔木层碳密度的

26.40%;果实碳密度最小,仅占乔木层碳密度的 2.45%。油松人工林乔木层各器官碳密度分配按大小排序为:树干>树枝>树根>树叶>树皮>果实(图 1a)。

植被层碳密度中,乔木层碳密度所占比例最高,为 95.30%,其次为草本层、灌木层。可见,植被层碳密度主要取决于乔木层。枯落物层碳密度较小,为 0.37 t/hm²,仅是植被的 2.90%,其中枯落物层未分解层高于半分解层。

土壤层总碳密度为 39.72 t/hm²,且土壤层碳密度存在显著差异,50—100 cm 碳密度最高,为 15.23 t/hm²,20—30 cm 碳密度最低,为 3.01 t/hm²(图 1b, 1c)。

油松人工林碳库主要分为 3 部分:植被层、枯落物层和土壤层。油松林生态系统平均碳密度为 52.86 t/hm²,植被层占生态系统碳密度的 24.14%,枯落物层占生态系统碳密度的 0.71%,土壤层占生态系统碳密度的 75.15%。其空间分布排序为土壤层>植被层>枯落物层(图 1d)。

表 6 油松人工林不同土壤层碳含量

土层/cm	0—10	10—20	20—30	30—50	50—100
碳含量/%	7.83±1.40 ^a	5.08±0.23 ^b	2.38±0.06 ^c	2.32±0.09 ^c	2.29±0.07 ^c

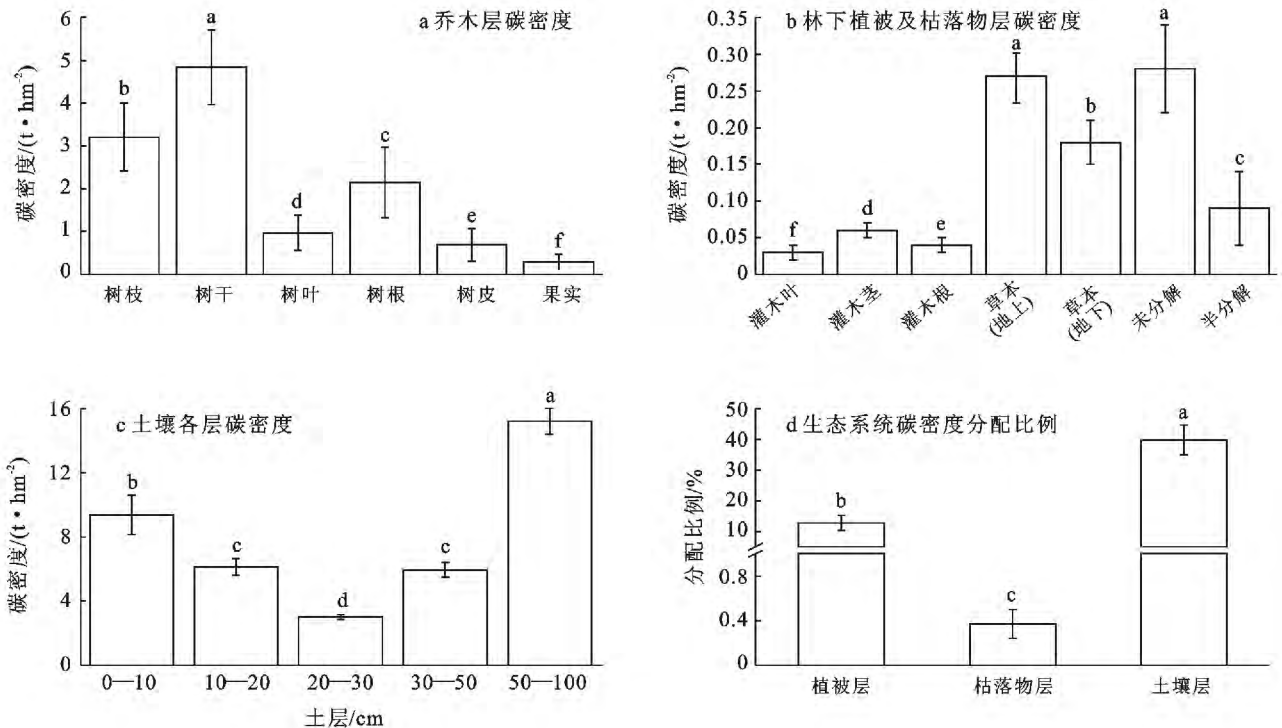


图 1 油松人工林碳密度及其分布

2.4 生态系统碳密度与主要生态因子的相关性

从表 7 中可以看出,植被层碳密度与枯落物未分解干质量、土壤含水量、土壤容重、灌木层盖度存在显著的相关性($p < 0.05$),与度树高、胸径、林分郁闭都存在极显著的相关性($p < 0.01$)。枯落物层碳密度与枯落物未分解干质量、灌木层盖度、草本层盖度、树高、胸径、林分郁闭度存在极显著的相关性($p <$

0.01)。土壤层碳密度与枯落物未分解干质量、土壤含水量存在显著的相关性($p < 0.05$),与土壤容重、树高、胸径、林分郁闭度存在极显著的相关性($p < 0.01$)。生态系统总碳密度与枯落物未分解干质量、土壤含水量、土壤容重、灌木层盖度存在显著的相关性($p < 0.05$),与度树高、胸径、林分郁闭都存在极显著的相关性($p < 0.01$)。

表 7 碳密度及其生态因子相关性分析

生态因子	植被碳密度	枯落物层碳密度	土壤层碳密度	总碳密度
枯落物未分解质量/($g \cdot m^{-2}$)	0.919*	0.978**	0.918*	0.935*
枯落物半分解质量/($g \cdot m^{-2}$)	0.368	0.516	0.323	0.447
土壤含水量/%	0.818*	0.802	0.816*	0.819*
土壤密度/($g \cdot cm^{-3}$)	0.926*	0.670	0.986**	0.947*
土壤 pH 值	0.675	0.697	0.605	0.644
灌木层盖度/%	0.978*	0.962**	0.756	0.970*
草本层盖度/%	0.718	0.908**	0.684	0.703
平均树高/m	0.998**	0.927**	0.985**	0.994**
平均胸径/cm	0.995**	0.936**	0.986**	0.993**
林分密度/(株· hm^{-2})	-0.344	-0.355	-0.437	-0.388
郁闭度	0.994**	0.985**	0.976**	0.987**

注: ** 相关性极显著($p < 0.01$); * 相关性显著($p < 0.05$)

3 结论与讨论

陇东地区退耕还林地油松人工林乔木层各器官碳含量变化范围为 48.58%~53.54%,其大小顺序依次为:树干>树叶>树枝>树皮>树根>果实。与山西省油松各器官碳含量波动范围 47.74%~54.14%^[21],杉木各器官碳含量波动范围 45.58%~50.03%^[22]具有相似性。林下植被层中,灌木层碳含量大小顺序为:灌木茎>灌木叶>灌木根;草本层碳含量大小顺序为:地上部分>地下部分。由于枯落物半分解层有机物质被分解,导致枯落物未分解层碳含量高于半分解层碳含量。土壤层碳含量随着土壤深度增加而逐渐减小,且 0—10 cm,10—20 cm 土壤层碳含量差异显著,20—30 cm,30—50cm,50—100 cm 土壤层碳含量差异不显著。

陇东油松人工林生态系统总碳密度为 52.86 t/ hm^2 ,低于中国森林平均碳密度 258.83 t/ hm^2 ^[23]。研究结果与陕西黄土高原地区 20 a 油松人工林碳密度 48.842 t/ hm^2 ^[12],8 年生侧柏人工林碳密度 49.312 t/ hm^2 和刺槐人工林碳密度 62.917 t/ hm^2 ^[24]基本一致,低于子午岭林区 20 a 油松人工林碳密度 164.55 t/ hm^2 ^[13]和山西 38 a 油松人工林碳密度 172.95 t/ hm^2 ^[21]。由于不同地区地理位置、气温差异、立地条件等条件的不同^[25-27],其对植物生长起着重要作用,进而影响碳

密度^[28-29]。可见,陇东地区退耕还林地油松人工林的碳密度与黄土丘陵区域造林树种相当,具有良好的固碳效益,但与其他地区碳密度仍存在一定的差异。从空间尺度上,各层次对油松人工林贡献大小并不相同,土壤层(0—100 cm)土壤碳密度占整个生态系统的 75.15%,是油松人工林生态系统碳密度最大的碳库,按大小顺序具体表现为:土壤层>植被层>枯落物层。

本研究中,陇东地区油松人工林林分平均树高、平均胸径、郁闭度均与各层碳密度呈现极显著正相关性($p < 0.01$),与其他研究结果相同^[30]。在油松人工林幼林阶段,随着年龄增长,油松林胸径和树高逐渐增大,林分郁闭程度增大并逐渐郁闭成林,造成油松人工林碳密度与之显著相关。同时也表明在油松人工幼林龄阶段中,树高、密度和郁闭度对油松人工林碳密度有极重要影响,在该发育阶段,应当尽量减少人为干扰破坏,采取人工林天然化经营的培育方法^[31],最大限度发挥油松人工林碳密度效益。枯落物层未分解干物质对各层碳密度均呈显著正相关性($p < 0.05$),表明枯落物层在油松生态系统碳密度的重要性,枯落物层发挥着保持水土、维持养分等重要生态效益,这也解释了枯落物层碳密度占油松人工林总碳密度的比重小但及其重要的原因,与前人研究结果相同^[32],应加强对枯落物层保护。

[参 考 文 献]

- [1] Tans P P. How can global warming be traced to CO₂ [J]. Scientific American, 2006, 295(6):124.
- [2] 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.
- [3] Brown S. Present and potential roles of forests in the global climate change debate[J]. Unasylya, 1996(47): 3-10.
- [4] Lorenz K, Lal R. Carbon sequestration in forest ecosystems[M]. Dordrecht: Springer, 2010.
- [5] Houghton R A. Balancing the global carbon budget[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35(1): 313-347.
- [6] 张小全,李怒云,武曙红. 中国实施清洁发展机制造林和再造林项目的可行性和潜力[J]. 林业科学, 2005, 41(5): 139-143.
- [7] 武曙红,张小全,李俊清. CDM 林业碳汇项目的泄漏问题分析[J]. 林业科学, 2006, 42(2):98-104.
- [8] 黄从德,张健,杨万勤,等. 四川人工林生态系统碳储量特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8):1644-1650.
- [9] 王彬,王辉,杨君珑,等. 子午岭油松林林隙更新特征研究[J]. 林业资源管理, 2007(2):60-65.
- [10] 焦醒,刘广全. 陕西黄土高原油松生长状况及其影响因素分析[J]. 西北植物学报, 2009, 29(5):1026-1032.
- [11] 邓娟,上官周平. 子午岭林区人工与天然油松林(*Pinus tabulaeformis*)养分库和碳库特征[J]. 生态学报, 2009, 29(6):3231-3240.
- [12] 贺亮,苏印泉,季志平,等. 黄土高原沟壑区刺槐、油松人工林的碳储量及其分布特征研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(4):49-53.
- [13] 孟蕾,程积民,杨晓梅,等. 黄土高原子午岭人工油松林碳储量与碳密度研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 133-137.
- [14] 董鸣,蒋高明,孔繁志,等. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社, 1996.
- [15] 秦武明,何斌,韦善华,等. 厚荚相思人工幼林生态系统碳储量及其分布研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 14089-14092.
- [16] 马钦彦. 中国油松生物量的研究[J]. 北京林业大学学报, 1989, 11(4):1-10.
- [17] Ter-Mikaelian M T, Korzukhin M D. Biomass equations for sixty-five North American tree species[J]. Forest Ecology and Management, 1997, 97(1):1-24.
- [18] 毕君,黄则舟,王振亮. 刺槐单株生物量动态研究[J]. 河北林学院学报, 1993, 8(4):278-282.
- [19] 罗辑,杨忠,杨清伟. 贡嘎山森林生物量和生产力的研究[J]. 植物生态学报, 2000, 24(2):191-196.
- [20] 程先富,史学正,于东升,等. 兴国县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系[J]. 地理研究, 2004, 23(2): 211-217.
- [21] 程小琴,韩海荣,康峰峰. 山西油松人工林生态系统生物量、碳积累及其分布[J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2455-2460.
- [22] 方晰,田大伦,项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布[J]. 林业科学, 2002, 38(3):14-19.
- [23] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5):518-522.
- [24] 王蕾,张景群,王晓芳,等. 黄土高原两种人工林幼林生态系统碳汇能力评价[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7):75-78.
- [25] Watanabe Y, Masunaga T, Owusu-Sekyere E. Evaluation of growth and carbon storage as influenced by soil chemical properties and moisture on teak (*Tectona grandis*) in Ashanti region, Ghana[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2009, 7(2):640-645.
- [26] 吴丹,邵全琴,李佳,等. 江西中南部红壤丘陵区主要造林树种碳固定估算[J]. 生态学报, 2012, 32(1):142-150.
- [27] 王晓丽,王媛,石洪华,等. 山东省长岛县南长山岛黑松和刺槐人工林的碳储量[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5):1263-1268.
- [28] Goetz R U, Hritonenko N, Mur R, et al. Forest management for timber and carbon sequestration in the presence of climate change: The case of *Pinus sylvestris* [J]. Ecological Economics, 2013(88):86-96.
- [29] Chen Shutao, Huang Yao, Zou Jianwen, et al. Mean residence time of global topsoil organic carbon depends on temperature, precipitation and soil nitrogen [J]. Global and Planetary Change, 2013, 100(1):99-108.
- [30] 刘恩,刘世荣. 南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征[J]. 生态学报, 2012, 32(16):5103-5109.
- [31] 张文辉,刘国彬. 黄土高原植被生态恢复评价、问题与对策[J]. 林业科学, 2007, 43(1):102-106.
- [32] Seely B, Welham C, Blanco J A. Towards the application of soil organic matter as an indicator of forest ecosystem productivity: Deriving thresholds, developing monitoring systems, and evaluating practices[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(5):999-1008.