

不同林龄刺槐人工林碳储量及分配规律

贾汉森^{1,2}, 段 劫^{2*}, 马履一^{1,2}, 杨欣超^{1,2}, 王少明¹, 米 锋³

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 国家能源非粮生物质原料研发中心, 北京 100083; 3. 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083)

摘 要: 为研究林龄对刺槐林生态系统碳储量的影响, 在样地调查与实测生物量的基础上, 对河南省洛宁县灌木林人工改造的 8、15 和 22 年生刺槐人工林进行了研究, 测定了刺槐林及同区域灌木林不同层次的碳含量(乔木层、灌草层、枯落物层和土壤层(0~50 cm)), 结合生物量及土壤数据分析其生态系统的碳储量和层次分布特征。结果表明, 刺槐各器官碳含量在 42.60%~50.92%之间, 大小顺序为: 树干>树皮>树枝>根桩>树叶>粗根>小根>大根>中根>细根; 各林分的灌草层、枯落物层碳含量无显著差异; 土壤层碳含量均表现为随土壤深度增加而降低, 而随着种植年限的增加而增加; 灌木林及 8、15 和 22 年生刺槐人工林生态系统碳储量分别为 78.96、99.78、110.85 和 132.75 t·hm⁻², 对比灌木林, 8、15 和 22 年生刺槐林碳储量年均增长量分别为 2.60、2.13 和 2.44 t·hm⁻²·a⁻¹; 乔木层及土壤层是刺槐人工林生态系统碳储量的主要来源, 两者占生态系统碳储量 85.14%~96.63%。随种植年限增加刺槐林土壤层碳储量所占比重下降而乔木层碳储量比重逐渐上升, 灌草层、枯落物层碳储量无明显变化规律。

关键词: 刺槐人工林; 碳储量; 碳含量; 林龄; 分配

中图分类号: S792.27

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2017)04-0636-07

Characteristics of carbon storage and sequestration in different age *Robiniapedudoacia* plantations

JIA Hansen^{1,2}, DUAN Jie², MA Lvji^{1,2}, YANG Xinchao^{1,2}, WANG Shaomin¹, MI Feng³

(1. Key Laboratory of Silviculture and Conversation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. National Energy R&D Center for Non-food Biomass, Beijing 100083;

3. School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to identify the age-sequence of *Robiniapedudoacia* plantations on ecosystem carbon storage, a survey was conducted in 8-, 15- and 22-year-old *Robiniapedudoacia* plantations and shrubwood in Luoning County, Henan Province. The carbon content in the arborous layer (different organs), shrub-grass layer, litter layer and soil layer (0-50 cm) was determined. The ecosystem carbon storage along with characteristics was analyzed based on the biomass and the data analysis of the soils. The result showed that the carbon content in *Robiniapedudoacia* organs ranged from 42.60% to 50.92%, with an ascending order of trunk, bark, branch, root-stock, leaf, thick root, rootlet, big root, medium root, and fine root. There was no significant difference in carbon content in the shrub layer, herb layer and litter layer among the four stands. The carbon storage in these four ecosystems was 78.96, 99.78, 110.85 and 132.75 t·hm⁻², respectively. Compared with the shrub wood, the annual mean increments of carbon pool in the 8-, 15- and 22-year-old *Robiniapedudoacia* plantations were 2.60, 2.13 and 2.44 t·hm⁻²·a⁻¹, respectively. The arbor and soil layers were the main carbon pools, which contributed 85.14%-96.63% of the total. The carbon content in the arbor layer increased with an increase of the stand age, while it decreased in the soil layer. In other layers, however, no significant changes were observed in this study.

Key words: *Robinia pseudoacacia* plantation; carbon storage; carbon content; stand age; allocation

收稿日期: 2017-03-17

基金项目: 教育部人文社会科学项目青年基金项目(13YJCZH131), 国家国际科技合作专项“高效先进生物质原料林可持续经营技术合作研究”(2014DFA31140)共同资助。

作者简介: 贾汉森, 硕士研究生。E-mail: 15201438271@163.com

* 通信作者: 段 劫, 博士, 讲师。E-mail: duanjiefu@vip.qq.com

自 18 世纪末的工业革命开始,化石燃料的大量使用及类似森林砍伐土地利用方式导致人类社会对大气排放了大量的 CO_2 ^[1]。有研究表明 CO_2 等温室气体含量的快速提高是导致气候变暖的主要原因,对 CO_2 吸收和固定的研究也逐渐成为全球气候变化研究的重要内容^[2-3]。森林作为陆地生态系统的主体,在其生长过程中通过光合作用以生物量的形式将 CO_2 固定在其体内和土壤中,储存着全球 86% 的植被碳库和 73% 的土壤碳库,是全球碳平衡过程中不可替代的组成部分^[4-5]。伴随着大规模的造林运动及“退耕还林”、“防护林建设”等林业工程的开展实施,中国人工林的蓄积量持续增加,人工林在 CO_2 吸收和固定及减缓气候变暖等方面的作用也日益得到人们的广泛关注^[6-7]。

刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 分布范围广,集用材、饲料、蜜源和薪炭等多种用途于一身,是主要的荒山造林先锋树种之一,现已在华北低丘山地及黄土高原丘陵区被广泛种植^[8]。同时,具有高热值、生长速度快、根蘖力强等凸显其高能源价值的特性^[9-10],因此刺槐成为我国重点发展的生物质能源树种之一。目前对黄土高原丘陵区刺槐人工林生态系统碳储量及分配规律的研究较多^[11-14],而对其他地区荒山造林后不同林龄刺槐林的碳储量变化的研究较少。使用样地调查与实测生物量的方法,将 8、15 和 22 年生刺槐人工林与灌木林的碳储量进行对比研究,以期能够揭示荒山造林后刺槐人工林碳储量随林龄的动态变化规律,提高刺槐人工林区域尺度上碳储量估算的精确性,同时为刺槐生物质燃料全生命周期碳排放的研究提供种植阶段的部分数据。

1 研究地区与研究方法

1.1 区域自然概况

研究区位于河南洛宁吕村林场(34°20′~34°32′ N, 111°15′~111°35′ E),场区位于秦岭向东延伸之余脉、崤山山系南麓,地势北高南低,西高东低,属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 13.7℃,绝对最高气温 42℃,绝对最低气温 -21℃,无霜期为 215 d,年平均降水量 606 mm,多集中于 7—9 月,占全年降水量 47%,年平均相对湿度 69%。土壤为褐土。人工林类型以刺槐人工林为主。

选取 8、15 和 22 年生刺槐人工林和灌木林为研究对象。各年龄刺槐人工林均是荒坡植被恢复时营建的人工纯林,造林方式相同,种植苗均为林场苗圃培育 2 年生实生苗,初植密度为 2 m×2 m,人工林的管理方式均依照吕村林场的营林方案。林下灌木主要有酸枣 (*Ziziphus jujube* var. *spinosa*)、荆条 (*Vitex negundo* L. var. *heterophylla*); 草本主要有艾蒿 (*Artemisia argyi*)、铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、白草 (*Pennisetum centrasiticum*)、茜草 (*Rubiaceae cordifolia* L.)、细叶苔草 (*Carex rigescens*)、酢浆草 (*Oxalis corniculata* L.) 和马唐 (*Digitaria sanguinalis* L.) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查 野外调查于 2015 年 8 月进行,根据吕村林场所提供的不同造林时期的林区分布图,在研究区内选取了地理位置毗邻的 12 块样地,其中灌木林样地 3 块,8、15 和 22 年生刺槐林样地各 3 块,样地面积均为 20 m×20 m,所有样地均处于同一气候背景之下。各样地林分特征见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of plots

样地 Sample plot	平均树高/m Average tree height	平均胸径/cm Average DBH	密度/株·hm ⁻² Density	郁闭度 Coverage	坡向 Aspect	坡度/° Slope
灌木林 Shrubbery	1.8±0.4	—	1 450	0.4	阳坡	13.5
8 年生刺槐 8-year old Rp	8±1.3	6.1±1.8	3 575	0.6	阳坡	12.3
15 年生刺槐 15-year old Rp	9.7±2.1	9.1±2.7	2 375	0.8	阳坡	12.6
22 年生刺槐 22-year old Rp	10.8±2.8	10.6±2.9	2 225	0.8	阳坡	16.7

Rp 为刺槐人工林,下同。Rp is short for *Robinia pseudoacacia*, the same below.

1.2.2 刺槐标准木生物量测定 对刺槐人工林标准地进行每木检尺,胸径用胸径尺测定,树高超声波测高仪来测定,完成测定后计算各林分的平均树高及平均胸径。在每块样地内确定 1 株代表林分平均胸径和平均树高的标准木进行生物量测定,共选择

了 9 株标准木。将刺槐标准木沿地表水平面伐倒,采用 Monsi 分层切割法,地上部分按每段 1 m 进行区分,分成树干、树皮、树枝和树叶各部分。地下部分采用全根挖掘法,将不同根系分为细根(根径 <0.2 cm)、小根(根径 0.2~0.5 cm)、中根(根径

0.5~1 cm)、大根(根径1~2 cm)、粗根(根径>2.0 cm)和根桩6类^[15]。野外实测各部分鲜重量,树枝、树叶和树根各部分取样500 g,同时截取每段树干底部圆盘(厚度3 cm)作为样品,带回实验室进行含水量测定并计算干质量。根据9株标准木生物量的实测数据,建立刺槐各器官生物量(W)与 D^2H (胸径平方与树高的乘积)之间的相对生长方程(表2),用以估测刺槐各器官的生物量。

表2 刺槐各器官生物量(W)与胸径(D)、树高(H)的相对生长方程

Table 2 Organ biomass (W) allometric equations of diameter at breast height (D) and height (H) of *Robinia pseudoacacia*

器官 Organ	生长方程 Allometric equation	R^2
树干 Stem	$\lg W = -1.071 + 0.759 \lg(D^2H)$	0.990
树皮 Bark	$\lg W = -2.932 + 1.187 \lg(D^2H)$	0.989
树枝 Branch	$\lg W = -1.361 + 0.683 \lg(D^2H)$	0.883
树叶 Leaf	$\lg W = -0.672 + 0.276 \lg(D^2H)$	0.854
树根 Root	$\lg W = -1.109 + 0.698 \lg(D^2H)$	0.963

1.2.3 灌草及枯落物生物量测定 在每块标准样地内沿对角线布设5个2 m×2 m的灌木样方和5个1 m×1 m的草本样方,记录灌草样方内物种种类、个体数、高度和覆盖度。灌木及草本均采用全挖法,灌木及草本均分地上(灌木地上部分分为干、叶)和地下部分称量鲜重。枯落物采用全部收获法,将5个草本样方内的枯落物全部收集,称取鲜重。各部分均取样品500 g以上带回实验室,置于65℃烘箱中烘干至恒重,计算各部分含水率后将各样品的鲜质量换算成干质量。

1.2.4 土壤样品的采集 土壤取样在草本调查样方中进行,挖取土壤剖面分层采样,每个样方挖取5个土壤剖面,按0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, 30~50 cm分4层采集土壤样品,将同一样地内各采样点同层次的样品等量混合后取足量带回实验室,同时利用环刀法测定土壤容重。

1.2.5 含碳量及碳储量的测定 将粉碎后的植物样品与风干后的土壤样品过0.25 mm筛后均采用元素分析仪LiquiTOC II(德国)分析测定有机碳含量。根据各林分乔木层(干、枝、叶、皮和根)、灌草层以及枯落物层单位面积生物量与其含碳率的乘积得到不同组分的碳储量,土壤有机碳储量的计算公式如下^[16]:

$$SCOD = 0.1 \times \sum C_i \times B_i \times D_i$$

式中,SCOD为土壤有机碳密度($t \cdot hm^{-2}$); i 为土壤剖面所对应的层数, B_i 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); C_i 为

土壤剖面第*i*层土壤有机碳的含量($g \cdot kg^{-1}$); D_i 为不同土层的厚度(cm),0.1为单位换算系数。

1.2.6 数据处理 数据均利用Microsoft Excel 2013软件处理,用SPSS20.0软件进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)、双因素方差分析(two-way ANOVA)并通过Duncan多重比较检验比较不同类型林分各指标间的参数($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 碳含量

分析不同林龄刺槐人工林乔木层各器官含碳量,发现乔木层不同器官碳含量总的变化范围在42.60%~50.92%之间,种植年限对刺槐林各器官碳含量无显著性的影响(表3)。但乔木层不同器官间碳含量平均值却存在显著差异,按碳含量高低排列顺序为树干>树皮>树枝>根桩>树叶>粗根>小根>大根>中根>细根(表3)。

刺槐人工林及灌木林枯落物层、草本层地上部分、草本地下部分、灌木层叶、干和根的平均碳含量分别为39.70%、41.77%、39.18%、41.48%、43.22%和40.12%(表4)。对不同林龄刺槐林及灌木林的灌木层、草本层和枯落物层的碳含量经单因素分析后显示均无显著性差异。不同层次间,枯落物层和灌草层之间的平均碳含量存在差异($P < 0.05$),其他层次并无显著性差异。按碳含量高低排列顺序为灌木干>草本地地上>灌木叶>凋落物>灌木根>草本地下,其中灌草层碳含量均表现为地上(灌木地上部分为干和叶)高于地下(表4)。

从表4还可以看出,刺槐林及荒坡灌木林的土壤碳含量均表现为随土壤深度的增加而逐渐降低,其中0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm土层的碳含量明显大于30~50 cm土层,且差异性显著($P < 0.05$)。对4种林分相同土层的土壤碳含量进行对比发现:从荒坡灌木林改造为刺槐林后,刺槐林各层土壤碳含量均随着林龄的增加而增加,增加的速度逐渐加快,范围在1.22%~16.13%之间;而对比荒坡灌木林土壤碳含量,8年生和15年生刺槐林0~50 cm土壤有机碳含量与荒坡灌木林土壤有机碳含量无显著性差异,8年生刺槐林的碳含量相对灌木林还有一定的减少。但22年生刺槐林(0~30 cm)土层有机碳含量要显著高于其他林分。

2.2 碳储量

2.2.1 林分植被有机碳储量比较 由表5可知,相比于荒坡灌木林8年生、15年生和22年生刺槐林植被碳储量分别增加了17.98、26.21和37.63 $t \cdot hm^{-2}$,

差异均达到显著性水平 ($P<0.05$)。8 年生、15 年生和 22 年生刺槐林乔木层碳储量分别占植被层总碳储量的 81.22%、88.80%和 90.90%，占据了植被层最主要的部分，同时其所占比例的不断增长说明荒坡造林后植被层碳储量的增长主要来自于刺槐林乔木层生物量的积累。此外，刺槐林枯落物层碳储量也显著高于荒坡灌木林，相反灌木层碳储量要显著低于灌木林，同时两者之间草本层碳储量无显著差异。对比不同林龄刺槐林植被层各部分碳储量可

知，乔木层碳储量随着林龄的增加有显著提高，各器官中树干的碳储量最高，分别占整个乔木层的 44.22%、46.51%和 44.80%，碳储量高低排列顺序为树干>树根>树枝>树皮>树叶。8 年生、15 年生和 22 年生刺槐林草本层碳储量间无显著性差异。22 年生刺槐林灌木层碳储量显著高于 8 年生和 15 年生刺槐林。8 年生刺槐林凋落物层碳储量显著高于 15 年生和 22 年生刺槐林。同时灌草层碳储量均是地上部分高于地下部分。

表 3 不同年龄刺槐人工林各器官碳含量

Table 3 Carbon contents in different organs of *Robinia pseudoacacia* with different ages

组分 Component	树龄/a Age of tree			平均 Mean
	8	15	22	
树干 Stem	48.83±0.26	49.51±1.16	49.58±1.32	49.39±1.10 ^a
树枝 Branch	46.73±0.15	46.83±0.54	46.73±0.39	46.73±0.39 ^{bc}
树皮 Bark	47.14±1.38	48.26±0.25	46.68±1.42	47.15±1.33 ^b
树叶 Leaf	45.68±1.15	45.57±0.92	45.11±1.48	45.47±1.10 ^{de}
细根 Fine-root	43.66±1.42	45.63±0.99	45.81±0.96	45.03±1.43 ^e
小根 Small-root	45.07±0.17	45.16±0.33	45.54±0.85	45.25±0.52 ^e
中根 Medium-root	44.29±0.40	45.22±0.35	45.80±0.20	45.10±0.72 ^e
大根 Large-root	44.98±0.45	45.07±0.17	45.32±0.41	45.13±0.35 ^e
粗根 Thick-root	45.69±0.15	45.02±0.75	45.65±0.64	45.45±0.60 ^{de}
根桩 Stump	45.91±0.84	46.27±0.41	46.21±0.12	46.18±1.73 ^{cd}

注：不同小写字母表示各器官碳含量在 0.05 水平上差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level among treatments.

表 4 4 种林分在枯落物层、草本层、灌木层及土壤层碳含量

Table 4 Carbon contents in litter layer, herb layer, shrub layer and soil layer of the four stands

层次 Layer	组分 Component	林龄/a Age of tree			灌木林 Shrubbery
		8	15	22	
枯落物层 Litter		39.92±0.86	39.95±1.36	38.89±1.28	40.03±1.48
草本层 Herb layer	地上 Aboveground	42.52±0.58	40.73±2.29	41.71±2.27	42.11±3.34
	地下 Underground	39.16±0.94	38.49±0.94	39.69±0.96	38.36±1.25
灌木层 Shrub layer	叶 Leaf	41.29±0.23	41.24±1.47	41.26±0.48	42.13±0.28
	干 Stem	42.64±0.40	42.32±1.15	43.76±0.66	44.14±0.19
	根 Root	39.48±0.47	39.96±0.75	40.00±0.75	41.05±0.37
土壤层 Soil layer	0~10 cm	0.93±0.05 ^{Aa}	0.93±0.13 ^{Aa}	1.08±0.18 ^{Ab}	0.94±0.05 ^{Aa}
	10~20 cm	0.86±0.10 ^{Aa}	0.88±0.11 ^{Aa}	0.94±0.08 ^{Ab}	0.87±0.05 ^{Aa}
	20~30 cm	0.84±0.08 ^{Ba}	0.86±0.11 ^{Aa}	0.93±0.08 ^{Ab}	0.86±0.11 ^{Aa}
	30~50 cm	0.82±0.05 ^{Ba}	0.83±0.12 ^{Ba}	0.87±0.13 ^{Ba}	0.82±0.08 ^{Ba}

注：不同大写字母表示同一林分不同层次间在 0.05 水平上差异显著，不同小写字母表示同一层不同林分间在 0.05 水平上差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different capital letters indicated significant difference among different layers of same stand at the 0.05 level; different small letters indicate significant difference among different stands of the same layer at the 0.05 level.

2.2.2 林分土壤有机碳储量比较 表 6 表明，相比于荒坡灌木林，8 年生、15 年生和 22 年生刺槐林 0~50 cm 土壤有机碳储量分别增加了 2.84、5.68 和

16.17 t·hm⁻²，其中 15 年生和 22 年生刺槐林与灌木林的差异达到显著水平，除 8 年生刺槐林表层土壤 (0~10 cm) 有机碳储量要低于荒坡灌木林外，其

他各层次均是刺槐林高于荒坡灌木林。刺槐人工林各土层土壤有机碳储量均随种植年限的增加而增加,其中22年生刺槐林分0~10、10~20和30~50 cm土壤有机碳储量显著高于8年与15年生刺槐

林分。荒坡灌木林及刺槐林土壤有机碳储量均在表层(0~10 cm)达到最大,且随土层深度的增加而降低,且变化趋势与土壤有机碳含量的变化规律一致。

表5 4种林分植被有机碳储量比较
Table 5 Comparison of vegetation organic carbon storage in the four stands $t \cdot \text{hm}^{-2}$

层次 Layer	组分 Component	林龄/a Age of tree			灌木林 Shrubbery
		8	15	22	
乔木层 Arbor layer	树干 Stem	10.67±0.91 ^a	15.67±1.72 ^b	20.10±0.95 ^c	—
	树皮 Bark	1.58±0.05 ^a	3.67±0.52 ^b	5.40±0.44 ^c	—
	树枝 Branch	3.58±0.21 ^a	4.09±0.70 ^a	6.28±0.58 ^b	—
	树叶 Leaf	1.55±0.06 ^a	1.63±0.38 ^a	1.39±0.13 ^a	—
	根 Root	6.75±0.32 ^a	8.63±0.62 ^b	11.73±0.33 ^c	—
	小计 Subtotal	24.13±0.35 ^a	33.69±0.83 ^b	44.87±0.65 ^c	—
草本层 Herb layer	地上 Aboveground	0.62±0.21 ^a	0.62±0.21 ^a	0.63±0.26 ^a	0.84±0.07 ^b
	地下 Underground	0.39±0.13 ^a	0.42±0.03 ^a	0.37±0.15 ^a	0.63±0.11 ^b
	小计 Subtotal	1.07±0.72 ^a	1.1±0.31 ^a	1.02±0.13 ^a	1.52±0.09 ^a
灌木层 Shrub layer	地上 Aboveground	0.08±0.04 ^a	0.11±0.07 ^a	0.18±0.06 ^b	4.86±0.21 ^c
	地下 Underground	0.06±0.03 ^a	0.08±0.02 ^a	0.15±0.05 ^b	4.1±0.43 ^c
	小计 Subtotal	0.16±0.02 ^a	0.19±0.04 ^a	0.33±0.05 ^b	9.02±0.24 ^c
凋落物层 Litter layer		4.35±1.03 ^a	2.96±0.85 ^b	3.13±1.11 ^b	1.19±0.49 ^c
合计 Total		29.71 ^b	37.94 ^c	49.36 ^d	11.73 ^a

注:不同小写字母表示同一层不同林分间在0.05水平上差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among different stands of the same layer at the 0.05 level, the same below.

表6 4种林分土壤有机碳储量比较
Table 6 Comparison of soil organic carbon storage in the stands $t \cdot \text{hm}^{-2}$

林分类型 Stand type	土壤层 Soil layer				合计 Total
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~50 cm	
荒山灌丛 Wasteland shrub	14.87±0.65 ^a	13.00±1.47 ^a	13.20±1.36 ^a	26.17±3.21 ^a	67.23 ^a
8年生刺槐 8-year old Rp	14.52±1.95 ^a	14.00±1.21 ^a	13.56±1.93 ^a	27.99±4.63 ^a	70.07 ^{ab}
15年生刺槐 15-year old Rp	14.96±1.33 ^a	14.49±1.47 ^a	14.46±1.32 ^a	28.99±5.30 ^a	72.91 ^b
22年生刺槐 22-year old Rp	18.85±3.29 ^b	18.28±1.88 ^b	14.90±2.34 ^a	31.39±4.31 ^b	83.40 ^c

2.2.3 林分生态系统碳储量及其分配比较 从图1可知,灌木林、8年生、15年生和22年生刺槐人工林生态系统碳储量分别为78.96、99.78、110.85和132.75 $t \cdot \text{hm}^{-2}$,相对于荒坡灌木林8年生、15年生和22年生刺槐林人工林生态系统碳储量分别增长了20.82、31.89和53.79 $t \cdot \text{hm}^{-2}$,年均增长量分别为2.60、2.13和2.44 $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

荒坡灌木林生态系统碳储量分布格局表现为土壤层>灌木层>草本层>枯落物层,其中灌木层和土壤层为主要碳库,二者占据林分生态系统碳储量的85.14%。8年生、15年生和22年生刺槐林碳储

量分布格局均表现为土壤层>乔木层>凋落物层>草本层>灌木层,其中乔木层和土壤层为主要碳库,二者依次占林分生态系统碳储量的94.41%、96.16%和96.63%,所占比重随林龄增加逐步增大,为生态系统碳储量增加的主要来源。种植年限对刺槐林人工林生态系统碳储量分布格局有显著影响。其中,乔木层碳储量分配比例随林龄的增加而增大,所占比例分别为24.18%、30.40%和33.80%。而土壤层碳储量分配比例随林龄的增加而减小,所占比例分别为70.22%、65.77%和62.82%。其他层次无明显变化规律。

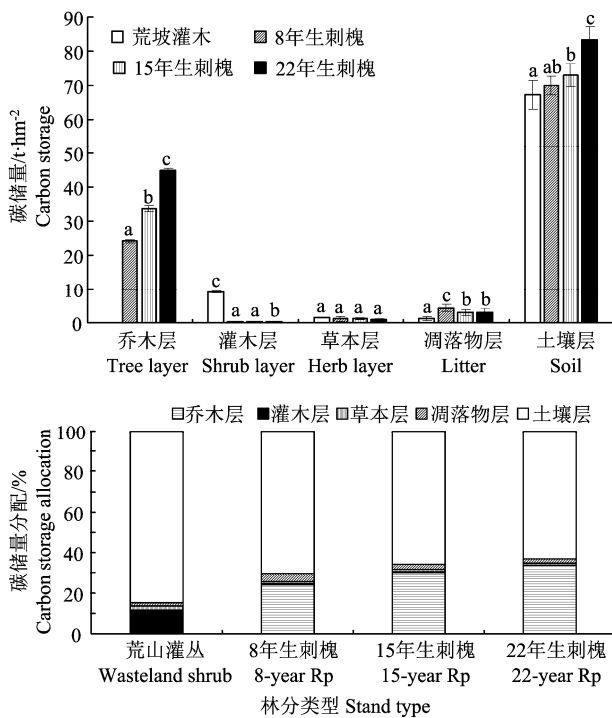


图 1 4 种林分生态系统碳储量及其分配

Figure 1 Carbon storage and allocation of ecosystem in the four stands

3 讨论与结论

本研究灌木林各器官的碳含量 (40.68%~42.41%) 低于宁夏六盘山区野李子 (*Prunussalicina*) 灌丛各器官的碳含量 (48.93%~50.98%)^[16], 而草本层和凋落物层碳含量 (37.11%~45.52%、38.52%~41.52%) 要高于宁夏六盘山区野李子草本层和凋落物层碳含量 (35.52%~45.12%、30.69%~32.77%)。刺槐人工林乔木层各器官碳含量 (42.60%~50.92%)、草本层碳含量 (38.01%~43.02%) 与黄土丘陵区刺槐人工林乔木层各器官碳含量 (43.6%~49.3%)、草本层碳含量 (39.6%~45.1%)^[13] 较为接近, 而凋落物层 (37.13%~41.02%) 的碳含量则低于黄土丘陵区刺槐人工林凋落物层 (40.3%~45.9%) 的碳含量。上述各林分不同层次的碳含量大多低于国际上估算森林碳储量时使用的通用的碳系数 (45%~50%), 可见如果利用这一系数来估算本地区刺槐林及灌木林的生态系统的碳储量时将可能导致结论被高估。本研究中刺槐林乔木层各器官碳含量高低排列顺序 (树干>树皮>树枝>根桩>树叶>粗根>小根>大根>中根>细根) 与黄土丘陵区刺槐林各器官碳含量高低排列顺序 (树干>细枝>中枝>粗枝>叶>根桩>大根>粗根>小根>中根>树皮>细根)^[13] 有明显差异, 这可能是刺槐的林龄和品种差异造成。

本研究表明, 研究所在地的荒坡灌木林植被有机碳储量为 $11.73 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与李克让等^[17] 估算的稀疏灌丛植被有机碳储量 $11\sim 12 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的结果类似, 而高于赵勇等^[18] 研究的河南太行山丘陵区植被演替过程中灌木阶段林地植被有机碳储量 $9.05 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 这表明本研究区内灌木林地植被固碳能力较强。而由荒坡灌木林改造而来的 8、15 和 22 年生刺槐林植被碳储量分别为 29.71 、 37.94 和 $49.36 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 低于周玉荣等^[19] 估测的我国森林植被平均碳储量 ($57.07 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), 高于刘迎春等^[20] 在黄土丘陵区 8、17 和 39 龄的刺槐林的植被碳储量 (分别为 25.08 、 35.68 和 $49.61 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。其中乔木层碳储量占植被层碳储量的绝大部分 (80%以上), 且配比随着种植年限的增加而增加, 这与程彩芳等^[21] 研究的由灌木林人工改造而来的 7、11 年生木荷-青冈栎混交林植被碳储量变化规律相似, 这表明用刺槐来进行相关荒坡灌木林改造能明显改善林地植被状况, 逐渐增强植被碳汇功能。

研究区域内荒坡灌木林的土壤 (0~50 cm) 有机碳储量为 $67.23 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 远低于李克让等^[17] 对中国灌丛平均土壤有机碳储量的估算结果 $94 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。荒坡灌木林改造为刺槐林生长 8、15 和 22 年后, 土壤有机碳储量分别比灌木林增加了 4.22%、8.23% 和 24.05%, 差异在 15 年后达到显著水平。林地土壤有机碳储量的变化主要取决于动植物残体、枯落物、根系分泌物和微生物残体及其代谢产物的输入与输出的动态平衡, 以及林地自身生物量的变化量^[22]。本研究中刺槐林各层次土壤有机碳储量均随林龄增加而增加。但有机碳密度随着土层深度的增加呈现降低趋势, 具有明显的表聚性。荒坡灌木林 0~10 cm 土层土壤有机碳储量要高于 8 年生刺槐人工林, 其原因可能是在对荒坡灌木林的改造的过程中受到整地和造林等人工干扰的影响, 对表层的枯落物、动植物残体造成了一定的破坏, 这会导致有机质的输入减少, 同时土壤可溶性有机有机碳的淋溶过程被促进, 相互作用下就会导致短时间内土壤表层土壤有机碳储量的降低^[23], 但随着林龄的增加, 林下灌草逐渐恢复, 枯落物逐渐累积, 刺槐根系的生长, 林分表层有机碳储量逐渐增加。

荒坡灌木林、3 种林龄刺槐林生态系统的碳储量分配格局中, 土壤层占据了生态系统有机碳储量的主体, 但随着林龄增大, 刺槐林土壤层所占比重下降而乔木层比重逐渐上升, 这表明乔木层是刺槐林生态系统的总有机碳储量增加的主要来源, 这与其他相关研究的结论相似^[24-26]。

荒坡灌木林生态系统的总有机碳储量明显高于以青冈栎、木荷为优势树种的灌木林有机碳储量 $54.11 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[21], 亦高于太行山丘陵区典型群落演替过程中灌木阶段的有机碳储量 $51.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[18]。8年生刺槐生态系统有机碳储量高于黄土丘陵区退耕还林地刺槐同龄林有机碳储量 $58.93 \sim 61.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[12]。15和22年生刺槐林有机碳储量高于黄土丘陵区17和30年生刺槐人工林有机碳储量 78.9 和 $103.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[13], 而低于周玉荣等^[19]估算的我国森林生态系统平均有机碳储量 $258.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。造成上述情况的原因是本研究区的土质及水热条件要明显优于黄土丘陵区, 更适宜刺槐林的生长。另一方面, 由于刺槐的根系深度本研究中调查的土壤深度为 $0 \sim 50 \text{ cm}$, 研究土壤深度不同可能是造成上述差异的原因。

参考文献:

- [1] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO_2 [J]. *Science*, 2004, 305(5682): 367-371.
- [2] CALDEIRA K, DUFFY P B. The role of the Southern Ocean in uptake and storage of anthropogenic carbon dioxide[J]. *Science*, 2000, 287(5453): 620-622.
- [3] NORBY R J, LUO Y. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO_2 and global warming in a multi-factor world[J]. *New Phytol*, 2004, 162(2): 281-293.
- [4] WOODWELL G M, WHITTAKER R H, REINERS W A, et al. The biota and the world carbon budget[J]. *Science*, 1978, 199(4325): 141-146.
- [5] POST W M, EMANUEL W R, ZINKE P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [6] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 人工林经营与全球变化减缓[J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3870-3877.
- [7] 陈先刚, 张一平, 詹卉. 云南退耕还林工程林木生物质碳汇潜力[J]. *林业科学*, 2008, 44(5): 24-30.
- [8] 王凤芹, 田丽青, 宋安东, 等. 华北刺槐林与自然恢复植被土壤微生物量碳、氮含量四季动态[J]. *林业科学*, 2015, 51(3): 16-24.
- [9] 谭晓红, 刘诗琦, 马履一, 等. 豫西刺槐能源林的热值动态[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2483-2490.
- [10] 赵静, 彭祚登, 江丽媛, 等. 豫刺 8 号主要木材化学成分与热值的关系[J]. *林业科学*, 2013, 49(5): 182-187.
- [11] 张景群, 苏印泉, 康永祥, 等. 黄土高原刺槐人工林幼林生态系统碳吸存[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2911-2916.
- [12] 申家朋, 张文辉. 黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律[J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2746-2754.
- [13] 艾泽民, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 333-341.
- [14] 申家朋, 张文辉, 李彦华, 等. 陇东黄土高原沟壑区刺槐和油松人工林的生物量和碳密度及其分配规律[J]. *林业科学*, 2015, 51(4): 1-7.
- [15] 张艳杰, 温佐吾. 不同造林密度马尾松人工林的根系生物量[J]. *林业科学*, 2011, 47(3): 75-81.
- [16] 杨丽丽, 王彦辉, 文仕知, 等. 六盘山四种森林生态系统的碳氮储量、组成及分布特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5215-5227.
- [17] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(1): 72-80.
- [18] 赵勇, 吴明作, 樊巍, 等. 太行山丘陵区群落演替进程中碳贮量变化特征[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 208-212.
- [19] 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.
- [20] 刘迎春, 王秋风, 于贵瑞, 等. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力[J]. *生态学报*, 2011, 31(15): 4277-4286.
- [21] 程彩芳, 陆爱云, 李正才, 等. 不同林龄木荷-青冈栎混交林幼林碳储量[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(10): 2705-2710.
- [22] 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.
- [23] 吴志祥, 谢贵水, 陶忠良, 等. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1484-1491.
- [24] YANAI R D, CURRIE W S, GOODALE C L. Soil carbon dynamics after forest harvest: An ecosystem paradigm reconsidered[J]. *Ecosystems*, 2003, 6(3): 197-212.
- [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] 崔秋芳, 赵佳宝, 陈家林, 等. 不同林龄阶段的松栎混交人工林碳储量研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 1944-1949.