

秦岭火地塘林区 3 种森林类型乔木层 碳密度和碳储量研究

任毅华^{1,2}, 蔡 靖^{1,3*}, 袁 杰¹, 张硕新^{1,3}

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 西藏农牧学院, 西藏 林芝 860000;

3. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 陕西 宁陕 711600)

摘要: 以秦岭火地塘林区锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、华山松(*Pinus armandi*)和油松(*Pinus tabulaeformis*) 3 种主要森林类型为研究对象, 通过标准地调查和生物量回归模型计算其碳储量, 并在此基础上估算了碳密度以及不同器官的碳储量。结果表明: 不同森林类型碳密度具有显著差异, 其中锐齿栎最高(118.724 t/hm²), 油松次之(106.062 t/hm²), 华山松最低(94.227 t/hm²); 3 种森林类型的碳储量均随着林分径级的增大呈现出上升、下降和再上升的趋势, 而大径级碳储量的上升主要取决于大径级单株林木的出现, 具有明显的随机性; 碳储量在不同树种各器官的分布表现为: 干>枝>根>皮>叶(锐齿栎), 干>枝>根>叶>皮(华山松), 干>枝>叶>根>皮(油松), 且不同树种同一器官及同一树种不同器官之间的碳储量所占比重差异显著。

关键词: 秦岭; 生物量回归模型; 碳密度; 碳储量

中图分类号: S718.55 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2012)09-0073-05

Carbon Storage and Density of Tree Layer of Three Types of Forest at Huoditang Forest Region in the Qinling Mountains

REN Yi-hua^{1,2}, CAI Jing^{1,3*}, YUAN Jie¹, ZHANG Shuo-xin^{1,3}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China; 2. Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi, 860000, China; 3. Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Ningshan, 711600, China)

Abstract: The carbon storage of sharptooth oak(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*) forest, armand pine(*Pinus armandi*) forest and Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forest was studied via plots investigation and regression models of biomass of the forests at Huoditang forest region in the Qinling Mountains, the carbon density and storage of different organs of the forests were also estimated. The results showed that there were significant differences among the carbon density of the three forests, sharptooth oak forest had the highest carbon density(118.724 t/ha), follow by Chinese pine forest(106.062 t/ha), armand pine forest had the lowest carbon density(94.026 t/ha). With the increase of diameter class of the stands, the carbon storage of the three forests increased first, and then decreased and finally increased again. The increased carbon storage of high diameter class depended on high diameter class trees at random. The order of carbon storage in different organs for sharptooth oak was stem-wood>branches>roots>bark>leaves. For armand pine, the order was stem-wood>branches>roots>leaves>bark. For Chinese pine the order was stem-wood>branches>leaves>roots>bark. There were significant differences among the carbon storage of the same organs of different tree species and different organs of the same tree species.

Key words: Qinling Mountains; the regression model of biomass; carbon density; carbon storage

收稿日期: 2012-03-30

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(201004036)

作者简介: 任毅华(1980-), 男, 陕西西安人, 硕士, 主要从事森林生态研究。E-mail: xzryh@yahoo.cn

* 通讯作者: 蔡 靖(1968-), 女, 陕西子洲人, 副教授, 博士, 主要从事植物生理生态、森林生态和森林植物研究。

E-mail: cjcaijing@163.com

随着人口增加和社会经济的发展,人类对自然资源的掠夺日益加剧,导致人类生存环境进一步恶化,大气中以 CO_2 为主体的温室气体逐渐增加进而引发了一系列环境问题,此已成为目前限制全球经济发展的主要因素之一。为了减少大气中 CO_2 含量,缓解全球气候变暖,全球碳循环研究应运而生,且发展迅速。森林作为陆地生态系统的主体,以不足陆地 1/3 的面积存储了陆地生态系统 76% 的有机碳^[1],其碳循环成为社会关注的焦点。

全球性陆地森林生态系统碳蓄积研究起始于 1964 年国际科联 (ICSU) 执行的国际生物学计划 (IBP),之后欧洲各国以及加拿大、美国、俄罗斯、巴西等国分别在不同尺度上对森林碳汇及其变化进行了大量的研究^[2]。研究显示,北温带及北方森林的碳累积为 $(0.7 \pm 0.2) \text{ Pg/a}$ ^[3];瑞典中部挪威云杉 (*Picea abies*) 林的碳累积在 $70 \sim 220 \text{ Gg/a}$ ^[4];俄罗斯西伯利亚东部边界的欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 林的净碳汇为 440 Gg/a ^[5];而通过对日本中部的温带落叶松 (*Larix gmelinii*) 林的长期观测发现,该森林是一个大的碳汇,其碳吸收达 128 Gg/a ^[6]。

中国森林碳汇研究起步较国外晚了 $10 \sim 15 \text{ a}$ ^[2],但发展非常迅速。研究人员主要以森林资源清查数据为基础,以尺度转化为主要估算方法,对中国森林的碳储量从不同尺度上进行估算。王效科等^[7]曾估算我国森林生态系统潜在的植物总碳储量为 8.41 Pg ,现有的实际碳储量只是潜在的植物总碳储量的 44.3%。周广胜等^[8]和罗天祥等^[9-11]在整理我国近 20 a 来的森林生物生产力、森林资源清查等数据的基础上,全面研究了我国主要森林类型生物生产力格局,建立了我国主要生物生产力优化模型系列,并估算出我国森林生物总产量为 $1.378 \times 10^{10} \text{ t}$ 。在 21 世纪初,一些科研人员推算了我国 50 a 来森林碳库及其动态变化,发现我国森林碳库由于受到土地利用方式、人口压力以及经济政策等因素的影响,呈现出先

降低后增加的变化规律^[12-15]。

秦岭横贯我国中部,是我国南北气候区的天然分界线,对东亚季风有明显的屏障作用,同时也是长江、黄河两大水系的自然分水岭。其植被不仅在水平地带上具有独特的过渡性特征,同时在海拔梯度上也呈现出明晰的垂直带谱。因此,对秦岭森林生态系统的研究不仅具有重要的理论和现实意义,而且在全国森林生态系统整体研究中也占据着重要地位。锐齿栎 (*Q. aliena* var. *acuteserrata*) 林、华山松 (*P. armandi*) 林和油松 (*P. tabulaeformis*) 林是秦岭的重要森林类型,分析其碳汇功能,理论和实践意义重大。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处秦岭火地塘林区海拔 $1\,400 \sim 2\,400 \text{ m}$ 的中山地带,分布区面积广阔,地形复杂,水热条件差异大。平均坡度 $30 \sim 35^\circ$,年均气温 $6 \sim 13^\circ\text{C}$,最高气温 $30 \sim 40^\circ\text{C}$,最低气温 $-12 \sim -25^\circ\text{C}$, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温 $2\,500 \sim 4\,000^\circ\text{C}$,年降水量 $700 \sim 1\,200 \text{ mm}$,多集中在 6—9 月。年蒸发量 $800 \sim 950 \text{ mm}$,相对湿度 $65\% \sim 70\%$ 。无霜期最长 $220 \sim 250 \text{ d}$,最短 $40 \sim 50 \text{ d}$ 。年日照时数 $1\,100 \sim 1\,300 \text{ h}$,土壤为火成岩、变质岩以及石灰岩母质上发育的中到弱酸性山地棕壤,土层厚度 $50 \sim 70 \text{ cm}$ 。

1.2 研究方法

1.2.1 标准地设置与数据采集 2011 年 6—9 月,在秦岭火地塘林区按照海拔、坡度、坡向等生态因素对锐齿栎 (*Q. aliena* var. *acuteserrata*)、华山松 (*P. armandi*) 和油松 (*P. tabulaeformis*) 3 种森林类型进行样地设置与调查(样地大小为 $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$),并在此基础上搜集秦岭定位站近 2 a 来的样地调查资料作为补充,共获取 34 块样地资料(表 1)。对所有样地资料进行统计分析,获取样地内所有乔木树种种类、胸径、树高和径级等数据。

表 1 秦岭火地塘林区 3 种森林类型标准地的基本特征

森林类型	海拔/m	坡度/ $^\circ$	坡向/ $^\circ$	土壤类型	主要伴生树种	郁闭度	胸径/cm	树高/m	林分密度/(株/hm ²)
锐齿栎	1 597~	23~34	14~318	山地棕壤土	1、2、3、4、5、6	0.50~	3.82~	3.5~	1 085~
	1 640					0.80	44.89	22.5	1 677
华山松	1 410~	15~34	194~288	山地棕壤土	2、4、6、7、8、9	0.40~	3.06~	3.5~	823~
	1 983					0.80	42.99	27.0	1 982
油松	1 400~	22~36	211~261	山地棕壤土	2、5、4、8、10	0.40~	3.04~	2.4~	836~
	1 690					0.80	44.59	30.0	1 759

注:伴生树种编号 1. 重齿槭(*Acer duplicato-serratum*); 2. 漆树(*Toxicodendron vernici fluum*); 3. 华山松(*P. armandi*); 4. 青榨槭(*Acer davidii*); 5. 华北落叶松(*Larix Principis-rupprechtii*); 6. 红桦(*Betula albo-sinensis* Burk.); 7. 油松(*P. tabulaeformis*); 8. 锐齿栎(*Q. aliena* var. *acuteserrata*); 9. 青杆(*Picea wilsonii*); 10. 黑榆(*Ulmus davidiana*)。

1.2.2 碳储量与碳密度的估算 植物碳储量根据植物生物量和含碳率计算,不同植物和同一植物的不同器官其含碳率有所不同,但在过去的相关研究中,多数学者均在不区分植物种类和器官的情况下,采取 0.45 或 0.50 作为植物平均含碳率进行碳储量估算^[16],从而造成估算结果不准确。为了精确估算秦岭火地塘林区 3 种森林类型的碳储量,本研究对 3 种森林类型进行了样地调查,利用陈存根等^[17]建

立的生物量回归方程,以及侯琳等^[18]实测的含碳率数据,估算了 3 种森林类型的碳储量(表 2)。3 种森林类型的碳储量分别是各个树木个体碳储量之和,计算公式为 $S=n\sum_{i=1}^5B_i\cdot R_i$ 。其中, n 为某一树种的个体数; B_i 为某一器官的生物量; R_i 为 B_i 所对应器官的含碳率。3 种森林类型的乔木层碳密度为林地内乔木树种碳储量与林地面积之比。

表 2 3 种森林类型的乔木树种各器官生物量回归模型

森林类型	器官	生物量回归方程	可靠性 95% 的 估算精度/%	含碳率/%
锐齿栎	干	$\ln W_S=0.992\ 53\ \ln(D^2H)-3.788\ 18$	94.24	46.79
	皮	$\ln W_{BA}=0.756\ 32\ \ln(D^2H)-3.924\ 50$	95.37	47.91
	枝	$\ln W_B=2.499\ 34\ln D-6.507\ 26$	84.27	46.61
	叶	$\ln W_L=2.293\ 44\ln D-4.885\ 81$	84.45	43.28
	根	$\ln W_R=2.764\ 35\ln D-4.208\ 17$	89.15	48.57
华山松	干	$\ln W_S=1.023\ 63\ln(D^2H)-4.499\ 70$	97.09	48.32
	皮	$\ln W_{BA}=0.884\ 17\ln(D^2H)-5.384\ 72$	96.73	43.37
	枝	$\ln W_B=2.575\ 51\ln D-4.084\ 52$	90.60	50.37
	叶	$\ln W_L=2.756\ 87\ln D-5.758\ 91$	81.56	51.35
	根	$\ln W_R=0.971\ 20\ln D-5.263\ 01$	92.13	47.59
油松	干	$\ln W_S=1.040\ 86\ln(D^2H)-4.631\ 43$	93.70	49.95
	皮	$\ln W_{BA}=0.773\ 96\ln(D^2H)-4.693\ 48$	93.12	49.25
	枝	$\ln W_B=2.577\ 33\ln D-4.080\ 26$	86.37	50.80
	叶	$\ln W_L=2.574\ 95\ln D-5.117\ 12$	73.77	51.45
	根	$\ln W_R=2.286\ 92\ln D-4.141\ 98$	82.60	44.25

注: D 为胸径; H 为树高; W_S 为干干质量; W_{BA} 为皮干质量; W_B 为枝干质量; W_L 为叶干质量; W_R 为根干质量。

2 结果与分析

2.1 3 种森林类型乔木层碳密度

不同森林类型由于其植物种类、森林结构及生境等因素不同,碳密度也存在显著差异。锐齿栎林碳密度的平均值最大(118.724 t/hm²),油松林次之(106.062 t/hm²),华山松林最小(94.227 t/hm²),其中华山松林碳密度变化范围较大,且 3 种森林类型间碳密度差异显著(表 3)。

表 3 秦岭火地塘林区 3 种森林类型乔木层碳密度

森林类型	碳密度/ (t/hm ²)	碳密度范 围/(t/hm ²)	样地数/ 个
锐齿栎	118.724±9.412a	102.650~123.672	12
华山松	94.227±12.481b	69.658~119.776	10
油松	106.062±6.378c	99.884~124.026	12

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 3 种森林类型不同径级的碳储量

由表 4 可知,锐齿栎与华山松在径级与株数

上均表现为小径级(4~14 cm)株数最多,其次是中等径级(16~28 cm),大径级株数最少,而油松则表现为高、中径级的株数偏少,3 种林型的低径级株数均偏高。由图 1 可知,在碳储量的分布上,华山松和锐齿栎表现相对一致,在 10 cm 径级以下碳储量最小,分别占总碳储量的 2.32% 和 4.48%;从 10 cm 径级开始,碳储量随着径级的增大而增高,在 20~30 cm 径级处碳储量达到最高值,分别占总碳储量的 42.76% 和 53.89%;径级在 30~40 cm 时,碳储量相对于径级的变化表现出明显的随机性。而油松则是径级从 18 cm 处开始随着径级的增大而逐步升高,径级在 32 cm 处,碳储量达到最高值(70.811 t),之后呈现急剧下降趋势。油松之所以在 18 cm 径级以下碳储量较低,主要是因为该林分在 12~18 cm 径级处株数较少。3 种林分的碳储量均在 36~40 cm 径级经降低后普遍呈现增长现象。

表 4 3 种森林类型乔木的径级与株数统计

表 4 3 种森林类型乔木的径级与株数统计																				株	
森 林 类 型	径级/cm																			合 计	
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40		>40
锐齿栎	83	99	47	37	36	35	39	24	28	23	23	11	8	3	5	6	2	3	3	3	518
华山松	40	45	32	25	39	35	36	43	28	44	24	13	21	9	6	2	10	1	1	3	457
油松	70	123	44	29	7	13	5	8	25	14	18	14	16	26	26	13	13	2	4	4	474

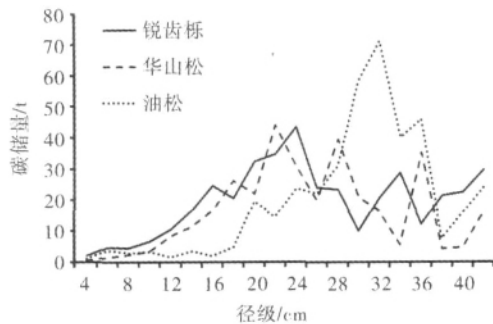


图 1 3 种森林类型乔木树种碳储量与径级的关系

2.3 碳密度在不同植物不同器官的分布

由表 5 可知,不同植物的同一器官或同一植物的不同器官,其生物量和含碳率都具有显著差异,

所以碳储量在各个器官上的分布也不均匀。锐齿栎干的碳储量最高,叶最低,枝和根的碳储量差异不显著($P>0.05$),其他器官差异均显著($P<0.05$);华山松和油松林干的碳储量最高,皮最低,华山松林各个器官碳储量差异显著($P<0.05$),油松林叶和根差异不显著($P>0.05$)。3 种森林类型相比较,锐齿栎林、华山松林和油松林皮的碳储量差异不显著($P>0.05$),华山松林和油松林枝的碳储量差异不显著($P>0.05$)。碳储量在各个器官的分配上,锐齿栎林以干、枝、根为固碳主体,占总碳储量的 92.74%,而华山松林和油松林则表现相对一致,以干和枝为固碳主体,分别占全株碳储量的 72.91%和 79.76%。

表 5 同一树种不同器官和同一器官不同树种碳储量比较

森林类型	干	皮	枝	叶	根
锐齿栎	42.08±2.11aC	4.76±0.55cA	26.02±2.59bA	2.52±0.19dC	24.62±0.008 1bA
华山松	49.34±1.48aB	5.09±0.21eA	23.55±1.27bB	8.03±0.34dB	13.98±0.002 5cB
油松	54.98±2.09aA	3.91±0.05dA	24.67±1.21AB	8.79±0.43cA	7.65±0.004 2cC

注:同行数据后标不同小写字母,同列数据后标不同大写字母者表示差异显著($P<0.05$)。

3 结论与讨论

3.1 3 种森林类型乔木层碳密度

锐齿栎、华山松和油松 3 种森林类型碳密度分别为 118.724 t/hm²、94.227 t/hm²、106.062 t/hm²,生物量加权平均含碳率分别为 0.491、0.487、0.494,比以 0.45 作为平均含碳率的估算值分别高出 9.1%、7.46%、9.58%;与 0.50 作为平均含碳率相比,其差异在 0.32%~2.54%,说明用 0.50 作为平均含碳率进行碳储量估算比 0.45 更能反映森林碳储量实际情况,这与前人的研究结果也基本相符^[19]。但要精确估算森林碳储量,还需要在不同地区建立不同树种不同器官含碳率数据库,并在此基础上利用生物量进行加权求算各树种转换系数。

本研究对 3 种森林类型碳储量的估算结果明显高于刘华等^[20]对该区的估算值。这种差异存在的原因主要在于研究方法和数据采集的时效性 2 个方面。首先,刘华等是以森林资源清查资料为依据进行碳密度估算,由于森林资源清查忽略了起测径级

以下的乔木树种生物量,因此其估算值偏低;其次,刘华等所采用的数据为 20 世纪 90 年代初期的数据,而森林经过近 20 a 的生长、发展,其时空结构、生物多样性以及生物量等已经发生了很大的变化,因此,20 世纪 90 年代初期的数据无法精确反映当前的碳储量和碳密度。此外,本研究对 3 种森林类型碳密度的估算结果也高于程堂仁等^[19]对甘肃小陇山森林植被碳库的估算结果以及国内森林植被平均碳密度,这可能与生境条件的差异有关。本研究区所在地为山地棕壤土,土层厚,热量足,气候适宜,因此具有更高的生产力。

3.2 3 种森林类型不同径级的碳储量

3 种森林类型小径级林木株数均偏高,这主要是因为在进行每木检尺时将 3 cm 径级以上的所有树种均按乔木对待,从而增加了小径级的株数;3 种林型的碳储量均在 36~40 cm 径级经降低后普遍呈现增长现象,这与 3 种林型的大径级林木出现与否有关,具有很大的随机性;小径级林木碳储量主要取决于林木个体的数量,单株对整体碳储量影响不大,

大径级的树木出现与否直接影响碳储量随径级变化的走势。

3.3 碳储量在不同植物不同器官的分布

锐齿栎与华山松、油松相比,其叶碳储量偏低,而根偏大,这主要是阔叶树种与针叶树种的差别,阔叶树种较针叶树种叶生物量偏低,而根系则较针叶树种发达;此外,在锐齿栎各个器官的含碳率中,叶含碳率最低(43.28%),而根含碳率大(48.57%),这是造成这一现象的另一原因;华山松、油松与锐齿栎相比,干碳储量所占比重明显偏高,这主要是因为针叶树种顶端优势较锐齿栎更为明显,因此具有更高的生物量;华山松与油松相比,根碳储量所占比重明显较大,说明华山松根系更为发达,保持水土能力也更强。

锐齿栎、华山松和油松是秦岭生态系统定位研究的主要森林类型,也是秦岭林区的主要建群树种,再加之所处地理位置特殊,因此研究其碳汇功能对秦岭林区,乃至全国的碳循环都具有重大意义,但由于以往研究方法和数据采集时间的不同,其研究结果具有明显的差异,如何统一标准,精确估算森林碳储量,以及结合森林生长规律研究森林碳库动态变化特征,以减少重复工作,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 尉海东,马祥庆,刘爱琴,等.森林生态系统碳循环研究进展[J].中国生态农业学报,2007,15(2):188-192.
- [2] 顾顺龙.森林碳汇问题研究[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,2006:8-16.
- [3] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263:185-190.
- [4] Lloyd J, Shibistova O, Tchekobkova N, *et al.* The carbon balance of a central Siberian forest[J]. Int Work Adv Flux Netw Flux Eval Proc, 2001:39-45.
- [5] Lindroth A, Grelle A, Monren A S. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity[J]. Global Change Biology, 1998, 4(4):443-450.
- [6] Yamamoto S, Saigusa N, Murayama S, *et al.* Long-term result of flux measurements from a temperature deciduous forest site[M]. Sapporo: ASAHI Printing CO, 2001:5-10.
- [7] 王效科,冯宗炜.中国森林生态系统中植物固定大气的潜力[J].生态学杂志,2000,19(4):72-74.
- [8] 周广胜,郑元润,陈四清,等.自然植被净第一性生产力模型及其应用[J].林业科学,1998,34(5):4-13.
- [9] 罗天祥,李文华.青藏高原自然植被总生物量的估算与净初级生产量的潜在分布[J].地理研究,1998,17(4):337-344.
- [10] 罗天祥,李文华,赵士洞.中国油松林生产力格局与模拟[J].应用生态学报,1999,10(3):257-261.
- [11] 罗天祥,李文华,罗辑,等.青藏高原主要植被类型生物生产量的比较研究[J].生态学报,1999,19(6):823-831.
- [12] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量[J].生态学报,1996,16(5):498-508.
- [13] 方精云,陈安平.中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J].植物学报,2001,43(9):967-973.
- [14] 王效科,冯宗炜,欧阳志云.中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J].应用生态学报,2001,12(1):13-16.
- [15] 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.
- [16] 焦燕,胡海清.黑龙江省森林植被碳储量及其动态变化[J].应用生态学报,2005,16(12):2248-2252.
- [17] 陈存根.秦岭火地塘林区主要森林类型的现存量 and 生产力[J].西北林学院学报,1996,11(3):92-102.
- [18] 侯琳,雷瑞德,王得祥,等.秦岭火地塘林区油松群落乔木层的碳密度[J].东北林业大学学报,2009,37(1):23-24.
- [19] 程堂仁,冯菁,马钦彦,等.甘肃小陇山森林植被碳库及其分配特征[J].生态学报,2008,28(1):33-44.
- [20] 刘华,雷瑞德.秦岭火地塘林区景观格局和主要森林类型碳储量变化的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2005.