

树种组成对北亚热带 11 年生常绿阔叶 人工林碳储量的影响

程彩芳¹, 李正才^{1*}, 周君刚², 吴亚丛¹, 赵志霞¹, 孙娇娇²

(1 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400; 2 富阳市林业局, 浙江富阳 311400)

摘要:以中国北亚热带退化灌木林改造而来的木荷-青冈栎混交林和杜英纯林为对象, 研究树种组成对常绿阔叶人工林生态系统碳储量的影响。结果表明: (1) 退化灌木林改造成两种人工林生长 11 年后, 生态系统植被、土壤碳储量均显著增加; 植被碳储量的增加主要来自乔木层。 (2) 两种人工林碳积累能力有差异。杜英林植被碳储量比木荷-青冈栎林高 99.4%, 其中杜英林的乔木层碳储量比木荷-青冈栎林高 $27.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 是后者的 2 倍; 杜英林土壤有机碳储量(0~50 cm)显著高于木荷-青冈栎林 $10.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中在 0~10、20~30 cm 土层杜英林均显著高于木荷-青冈栎林。研究表明, 退化灌木林人工改造成常绿阔叶林后生态系统碳储量显著增加, 杜英纯林碳蓄积能力明显高于木荷-青冈栎混交林, 说明在以增加碳储量为目的的退化生态系统改造过程中, 树种选择非常重要。

关键词:退化灌木林; 树种组成; 生态系统; 土壤碳储量

中图分类号: Q948.12; Q948.15⁺4

文献标志码: A

Effects of Tree Species Composition on Carbon Storage of 11 Years Old Evergreen Broad-leaved Plantations in North Subtropical Areas of China

CHENG Caifang¹, LI Zhengcai^{1*}, ZHOU Jungang², WU Yacong¹, ZHAO Zhixia¹, SUN Jiaojiao²

(1 Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang, Zhejiang 311400, China; 2 Forestry Bureau of Fuyang City, Fuyang, Zhejiang 311400, China)

Abstract: Taking *Schima superba*-*Cyclobalanopsis glauca* mixed plantation (SP) and *Elaeocarpus sylvestris* pure plantation (EP) both plantations were transformed from degraded shrub forest (DF) in north subtropical areas of China as test objects, we studied the effects of species composition on ecosystem carbon storage of broad-leaved plantations. (1) Both the vegetation and soil carbon storage significantly increased after the DF was transformed into broad-leaved plantations. The increases of vegetation carbon storage appeared mainly in arborous layers. Compared with DF, the soil carbon storage of SP and EP was significantly increased in each interval of 0–50 cm depth, respectively. (2) The vegetation carbon storage was higher in EP than that in SP, with an increase of 99.4%. Compared with SP, the carbon storage in arborous layer of EP was $27.75 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ higher, which was as twice as that of SP. The soil carbon storage in EP was $10.17 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ higher than that in SP, with a significant difference. In addition, the soil carbon storage in each interval of 0–50 cm depth of EP was higher than that in SP, with significant differences in 0–10 cm and 20–30 cm layer. To sum up, the total carbon storage of degraded shrub forest was significantly increased after transformed into evergreen broad-leaved plantation and EP had greater ability of carbon accumulation than SP. Results from the present study suggested that the choice of tree species would be important during

收稿日期: 2014-12-17; 修改稿收到日期: 2015-03-30

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50030); 浙江省自然科学基金项目(LY12C03012)

作者简介: 程彩芳(1989–), 女, 在读研究生, 从事森林生态系统结构与功能研究。E-mail: chengcf19@163.com

* 通信作者: 李正才, 博士, 副研究员, 从事森林生态系统结构与功能研究。E-mail: lizccaf@126.com

the restoration of degraded ecosystems with the aim of enhancing ecosystem carbon storage.

Key words: degraded shrub forest; species composition; ecosystem; soil carbon storage

近年来,由于大气中 CO_2 浓度不断升高导致的全球气候变化逐渐威胁到人类的生存与发展,采取有效措施来缓解气候变化越来越受到重视。降低大气 CO_2 浓度除了通过减小化石燃料排放 CO_2 的速率外,还可以通过增强陆地生态系统的碳汇功能来固定大气中 CO_2 [1-2]。森林作为陆地生态系统的主体,其植被碳储量约占全球植被的 77%,土壤中保存了全球土壤碳的 39%,是陆地重要碳汇 [3]。人工造林增加森林面积和加强森林管理提高森林质量是国家增加森林碳汇以应对气候变化的重要措施 [4]。

中国亚热带地区存在大面积的原始森林遭到破坏后形成的灌木林,这些群落所处的演替阶段较低,净生产力不高 [5],生态服务功能衰退,是典型的低效林地 [6]。阔叶化改造灌木林有利于促进这些林地的植被恢复,充分利用现有的土地资源,最大程度地发挥林业的生态、社会和经济效益 [7]。林分改造中,重点考虑造林树种、营造方式、抚育措施等因素的影响 [4,8-9],依据地带性森林群落树种配置原则,选择正确的目的树种,尤其是乡土阔叶树种具有重要的实践意义 [10-11]。

目前,关于退耕还林、荒山造林及林分改造等措施对生态系统碳储存影响的研究有很多 [12-14],但是这些研究主要集中于以用材林为培育目标的林分改造;已有的关于常绿阔叶林碳储量的报道也仅局限于天然常绿阔叶林 [15-18];在低效灌木林改造为人工林方面,造林后对土壤物理性状的影响 [6,11]、对林地综合效益的影响 [19]、对枯落物水文作用的影响 [20] 以及对土壤活性碳库、氮库的影响 [21] 的研究均有报道,但以生态效益为培育目标的灌木林改造成不同树种组成的常绿阔叶人工林生态系统碳储量变化的研究还很欠缺。造林树种植被组成的差异影响到植被残体碳库储量、分配以及土壤有机碳的输入 [22-23],不同树种的根系分布模式对林分有机碳储存也有影响 [24]。关于针、阔叶林分碳储量差异的比较有很多 [25-26],但关于不同阔叶树种的造林效果方面的研究少有报道。因此,本试验以北亚热带退化灌木林改造而来的两种常绿阔叶人工林为对象,研究不同树种组成林分生态系统碳储量的差异,以揭示碳储存与林分类型之间的关系,同时为该地区以生态效益为目的的常绿阔叶人工林营建中造林树种的选择以及提高人工林碳密度和碳储量提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江省富阳市 (119°25'~120°19.5'E, 29°44'~30°11'N),属于北亚热带季风气候,夏热冬冷,湿润多雨,年平均气温 16.2 °C,年降水量 1 464 mm,无霜期 237 d。该区域为低山丘陵地貌,土壤为石英、长石砂岩发育的微酸性红壤,历史上为森林地带,顶级群落为亚热带常绿阔叶林。因过去农业用地不断扩张,以及当地居民对木材、薪炭需求量较大的生活方式,该地区天然原始森林大多已遭到破坏,逐渐形成生态功能低下的退化灌木林(薪炭林),优势树种为青冈栎 (*Cyclobalanopsis glauca*)、木荷 (*Schima superba*),造林前人为干扰严重。

2002 年用青冈栎、木荷、杜英 (*Elaeocarpus sylvestris*) 等乡土阔叶树种 1 年生苗木(均为亚热带演替顶级树种)对部分灌木林进行补植造林(原有灌木林林分密度低,通过人工造林的方式可以促进林分更新),营造木荷-青冈栎人工混交林(木荷-青冈栎比例为 1:1,行间混交)和杜英纯林等两种类型生态公益林,初植密度为 3 m×3 m,采用挖穴造林的方式,穴长、宽、深均为 60 cm,造林后林分郁闭前每年秋季进行抚育管理。造林前,在研究区沿着等高线设立了 20 个面积为 20 m×20 m 的调查样方,调查分析各样方内的植被生长状况,并采集土样分析理化性质,以保证试验所设立的样方造林前土壤本底条件基本一致。调查样地基本情况见表 1(木荷、青冈栎和杜英均为亚热带地区萌芽能力较强的树种,调查样地立木密度都要高于造林初植密度)。

1.2 植被生物量调查

2013 年 7 月,选择造林前立地条件一致的木荷-青冈栎林、杜英林和保留的部分灌木林内(保留薪炭林经营方式,对照),各设置 5 个具有可比性的调查样方(坡向均为阳坡,样地均设于下坡,坡度为 25°左右,成土母质为石英、长石砂岩发育的微酸性红壤,每个样方面积为 20 m×20 m)。在人工林每个样方中进行每木调查,根据测得的树高、胸径,确定不同树种(木荷、青冈栎、杜英)的标准木,根据选定标准木各器官(干、枝、叶和根系)的大小和部位,采集一部分带回实验室,测定样品有机碳含量。乔木层生物量按照生物量模型法估算,充分考虑地域、

表 1 试验样地基本情况

Table 1 Basic situation of experimental plots

林分类型 Stand type	林龄 Stand age /a	平均树高 Average tree height/m	平均胸径 Average DBH/cm	立木密度 Stem density /(plant · hm ⁻²)	郁闭度 Canopy density	坡向 Slope aspect	坡度 Slope /°
SP	11	7	8.5	1300	0.8	阳坡 Sunny slope	23
EP	11	8	9.6	2275	0.9	阳坡 Sunny slope	25
DF	—	—	—	150	0.1	阳坡 Sunny slope	22

注:DBH. 胸径;SP. 木荷-青冈栎混交林;EP. 杜英纯林;DF. 退化灌木林;下同。

Note;DBH. Diameter at breast height;SP. *Schima superba*-*Cyclobalanopsis glauca* mixed plantation;EP. *Elaeocarpus sylvestris* pure plantation;DF. Degraded shrub forest;The same as below.

海拔、降水和温度等立地条件尽可能相似,通过文献对比,找出木荷、青冈栎和杜英生物量与胸径之间的关系方程^[27-28],分别计算两种人工林乔木层生物量。

在每个样方内按照 S 形布点设置 2 m×2 m、1 m×1 m 的小样方各 5 个,采用样方收获法测定灌木(2 m×2 m)、草本(1 m×1 m)和凋落物(1 m×1 m)生物量。样方内灌木、草本、凋落物分别称量鲜重,并各取部分样品带回实验室,85 ℃烘干至恒重测定含水率和碳含量,由各部分的鲜重与含水率之积分别计算灌木层、草本层、凋落物层生物量。

1.3 土壤样品采集分析

在林分各样方内,按 S 形布设 5 个土壤采集点,去除地表枯枝落叶后,土钻法分层采集 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 共 5 个土层的土样(50 cm 以下为土壤的母质层),把同样地内 5 个采样点同层次的土壤样品混合均匀后带回实验室,自然风干过筛后,采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量^[29]。用 100 cm³ 环刀测定 0~50 cm 各土层土壤容重,每个样方重复 5 次。

1.4 碳储量计算

植被(包括乔木、灌木、草本和凋落物)层碳储量均由各部分生物量与测定的碳含量计算得到。

土壤有机碳储量根据土壤容重、土壤有机碳含量和土层厚度计算,公式为: $S=\sum(B_i\times C_i\times D_i)$ 式中,S 为土壤有机碳储量, i 为土壤层次, B_i 为土壤容重, C_i 为土壤有机碳含量, D_i 为土层厚度。

1.5 数据分析方法

实验数据均采用 Excel 软件进行处理,应用 SPSS 18.0 软件的单因素方差分析法和最小显著差法(LSD)比较不同类型林分各指标的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同林型植被各组分有机碳储量比较

退化灌木林改造成木荷-青冈栎混交林和杜英纯林生长 11 年后,植被总碳储量分别增加了 23.64

和 51.57 t · hm⁻²,差异达到显著水平($P<0.05$,表 2),平均每年分别增长 2.15 和 4.69 t · hm⁻²。人工林乔木层集中了 90% 以上的植被碳储量,造林后乔木层生物量的不断积累是人工林植被碳储量的主要来源;此外,人工林凋落物层碳储量也比灌木林有明显提高,但其林下灌木、草本稀疏,碳储量显著低于灌木林。树种组成不同的两种人工林植被碳储量也存在差异,杜英林乔木层和凋落物层有机碳储量均高于木荷-青冈栎林,林下灌木层和草本层低于木荷-青冈栎林,植被总碳储量高于木荷-青冈栎林 99.40%,比木荷-青冈栎林多积累 27.93 t · hm⁻²,差异达到显著水平。两种人工林植被碳储量差异主要来自乔木层,杜英林乔木层碳储量比木荷-青冈栎林高 27.75 t · hm⁻²,是木荷-青冈栎林的 2 倍,差异显著,凋落物层碳储量比木荷-青冈栎林多积累 0.36 t · hm⁻²,但无显著差异。灌木层、草本层碳储量,杜英林均低于木荷-青冈栎林,共少积累 0.18 t · hm⁻²,且草本层差异显著。

2.2 不同林型土壤有机碳含量比较

造林后两种人工林分土壤 0~50 cm 各层有机碳含量均有不同程度提高(表 3),相比于灌木林,木荷-青冈栎林 0~10 cm 土层有机碳含量平均每年增加 0.87 g · kg⁻¹,各层年均增加幅度介于 0.25~0.87 g · kg⁻¹之间;杜英林土壤各层有机碳含量年均增加幅度介于 0.30~1.34 g · kg⁻¹之间,表层增幅最高。杜英林各层土壤有机碳含量均高于木荷-青冈栎林,变化幅度介于 8.57%~19.06%之间,在 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土层有显著差异。说明本研究区退化灌木林地阔叶化改造显著提高了土壤有机碳含量,杜英树种对土壤有机碳的改善效果优于木荷、青冈栎。

2.3 不同林型土壤有机碳储量比较

林分改造 11 年后,木荷-青冈栎林和杜英林土壤有机碳储量分别比灌木林增加了 30.99 和 41.16 t · hm⁻²(表 4)。在 0~50 cm 土壤各层中,两种人

表 2 不同林型植被有机碳储量比较

Table 2 Comparison of vegetation organic carbon storage in the stands of different types/(t · hm⁻²)

林分类型 Stand type	乔木层 Arboreal layer				林下植被 Understory vegetation		凋落物层 Litter layer	合计 Total
	树干 Trunk	树枝 Bark	树叶 Branch	树根 Root	灌木 Shrub	草本 Herb		
SP	12.41±0.59b	5.97±0.48b	1.86±0.15b	5.66±0.29b	0.34±0.03b	0.12±0.01b	1.74±0.06a	28.10b
EP	27.03±0.61a	8.98±0.55a	2.21±0.12a	15.43±0.95a	0.27±0.02b	0.01±0.01c	2.10±0.33a	56.03a
DF	—	—	—	—	3.14±0.22a	0.19±0.02a	1.14±0.24b	4.46c

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著;下同。
Note:Different normal letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level;The same as below.

表 3 不同林型土壤有机碳含量比较

Table 3 Comparison of soil organic carbon content in the stands of different types/(g · kg⁻¹)

林分类型 Stand type	土层 Soil layer/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
SP	27.02±1.65b	16.36±0.69b	10.96±0.50b	8.10±0.81a	6.30±0.52a
EP	32.17±3.02a	19.11±2.41a	13.03±1.75a	9.08±1.14a	6.84±0.78a
DF	17.44±1.52c	10.74±1.42c	6.27±0.87c	4.13±0.57 b	3.51±0.47 b

表 4 不同林型土壤有机碳储量比较

Table 4 Comparison of soil organic carbon storage in the stands of different types/(t · hm⁻²)

林分类型 Stand type	土层 Soil layer					合计 Total
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	
SP	30.29±1.84b	19.96±0.85a	13.41±0.61b	9.74±0.98a	7.23±0.60a	80.64b
EP	34.75±3.27a	22.54±2.85a	15.64±2.10a	10.35±1.30a	7.53±0.85a	90.81a
DF	20.71±1.81c	12.87±1.70b	7.21±1.00c	4.92±0.68b	3.93±0.53b	49.65c

工林土壤碳储量均高于灌木林,增幅介于 46.26%~97.97%和 67.79%~116.92%,差异均达到显著水平。杜英林土壤各层有机碳储量均高于木荷-青冈栎林,变化幅度在 4.15%~16.63%之间,其中,在 0~10 cm 和 20~30 cm 土层有显著差异,土壤总有机碳储量高于木荷-青冈栎林 10.17 t · hm⁻²,平均每年多积累 0.92 t · hm⁻²,差异达到显著水平。灌木林、木荷-青冈栎林和杜英林 3 种林分土壤有机碳储量均在表层(0~10 cm)达到最大,且主要集中在 0~20cm 土层,分别占土壤总碳储量的 67.65%、63.09%和 67.63%,随土层深度增加土壤碳储量呈现降低的趋势。

2.4 不同林型森林生态系统碳储量比较

退化灌木林改造为木荷-青冈栎林和杜英林两种林分经营 11 年后,植被碳储量和土壤碳储量均显著增加(图 1),生态系统碳储量分别增加了 54.62 和 92.72 t · hm⁻²,差异均达到显著水平;不同人工林类型之间生态系统碳储量也有差异,杜英林植被碳储量和土壤碳储量均高于木荷-青冈栎林,总碳储量比木荷-青冈栎林多积累 38.10 t · hm⁻²,差异达到显著水平。

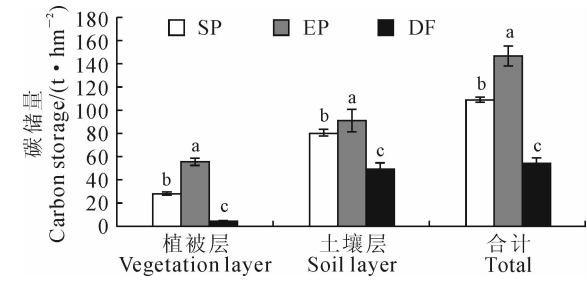


图 1 不同林型生态系统总碳储量

Fig.1 Total carbon storage in different forest ecosystems

3 结论和讨论

本试验以退化灌木林以及由灌木林改造而来的木荷-青冈栎混交林和杜英林为研究对象,通过比较 3 种林分生态系统碳储量的差异,进而分析几种乡土阔叶树种对退化灌木林的改造效果。

3.1 林分植被碳储量

本研究结果中,退化灌木林分植被活体(灌木和草本)碳储量为 3.33 t · hm⁻²,远低于李家永等^[30]报道的红壤丘陵区灌木林地植被活体碳储量(10.83 t · hm⁻²),以及李克让等^[31]估算的灌丛植被碳储量(12 t · hm⁻²),表明本研究区灌木林地生产力很低,

地上植被固碳能力差。灌木林改造成阔叶人工林生长 11 年后,植被碳储量分别为杜英林 $56.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、木荷-青冈栎林 $28.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,且人工林碳储量 90% 以上集中在乔木层,说明用乡土阔叶树种改造灌木林,能明显改善林地植被状况。但树种组成不同的两种人工林植被碳蓄积能力又有差异,杜英林植被碳储量显著高于木荷-青冈栎林,差异主要来自于乔木层,而林下灌木和草本层碳储量均低于木荷-青冈栎林。这是由于杜英与木荷、青冈栎相比是较为速生树种,尤其在幼林阶段表现更为明显^[32-33],杜英在适合的立地条件下初期生长较快,乔木层碳积累速率比木荷-青冈栎林要高,但是,随着林冠郁闭显著影响到了林下微环境和资源有效性^[34],杜英林冠层郁闭度高,阻止了大量光照到达林下层^[35],林下植被光合作用受到抑制,不利于生物量和有机碳的积累。此外,冠层遮蔽度高导致林下气温一定程度降低,在生长季,提高了林下植被的代谢速率^[36],有机碳积累相对较少。杜英林灌木和草本层碳储量占植被总碳储量的比重为 0.5%,低于木荷-青冈栎林的比重 1.6%,这与一些学者^[30,37]的研究结果一致,即林下灌木和草本层有机碳储量占林地总有机碳储量的比重随林地总生物量和林分密度的升高而下降。11 年生杜英林植被碳储量高于亚热带 10 年生红椎(*Castanopsis hystrix*)林($38.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[38]和浙江中部地区公益林平均水平($49.59 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[39],与中国森林植被平均水平($57.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[40]、广西 14 年生秃杉(*Taiwania flousiana*)林($57.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、福建中亚热带 20 年生马尾松(*Pinus massoniana*)林($56.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林($58.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)相近^[41],可知杜英林植被碳储量积累处于较高水平。两种人工林植被碳储量均低于周玉荣等^[40]的研究结果——中国常绿阔叶林植被碳储量($73.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),这可能是因为本研究区人工林营造时间较短,碳储量积累相对少的缘故。

3.2 林分土壤碳储量

3 种林分土壤碳含量均表现为表层最高,并随着土层的增加而减小的趋势,与已有的许多研究结果一致^[42-44],这是因为植物的细根系主要分布在上层土壤,而枯落物、腐殖质层对土壤有机碳积累的影响也随着土壤深度增加而降低^[37]。试验区退化灌木林土壤碳储量为 $49.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,远低于李克让等^[31]估算的灌丛土壤碳储量($94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),原因是灌木林地上植被生长差,凋落物归还量和植物根系

残体及其分泌物均较少,导致土壤有机碳积累不多,并且由于植物遮蔽比较差,地表受气象因素(水、热、风等)的直接影响较大,土壤有机质矿化作用强,从而导致土壤有机质含量偏低^[45]。灌木林改造为阔叶人工林生长 11 年后,土壤碳储量显著增加,这是因为随着乔木生物量的增长,土壤有机碳输入源不断增加,林分逐渐郁闭,林内环境大大改善,促使土壤有机碳储量快速积累。一些学者研究发现造林前的土地利用和土壤营养状况对造林后土壤碳储量的变化也有影响^[46-47],Bárcena 等^[48]研究发现温带地区农田造林在前 10 年可能会引起土壤碳流失,之后进入较长的恢复期;Vesterdal 等^[47]认为在营养贫乏的土壤上,由于有机质分解速率慢,土壤碳储量在造林后增加会较快;此外,本研究区采用补植造林,未进行整地,减小了对土壤结构和土壤团聚体的破坏,对土壤有机碳分解的影响较小^[49]。

Bárcena 等^[50]认为造林前土地利用、林分类型、林龄及土壤质地都会影响土壤有机碳的变化,本研究中造林树种成为影响两种人工林土壤有机碳的主要因素。Grigal 等^[51]认为,林地枯落物、根系产量和深度以及地上地下分配等树种因素能够通过影响有机碳输入土壤的模式、速度、数量和质量,进而影响土壤碳储量。Russell 等^[52]研究发现由树种因素引起的土壤有机碳变化主要限定在集中了 68% 的细根的表层土壤,且土壤有机碳含量与细根生长有显著相关性,而与地表碎屑输入相关性较低。一些学者^[53-54]也认为根系生物量和周转期对土壤有机碳的积累具有决定作用。本研究中,杜英林土壤碳储量显著高于木荷-青冈栎林 $10.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,且主要来自上层(0~20 cm)土壤。杜英林、木荷-青冈栎林年凋落物归还量分别为 2.73 、 $2.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,两者差异不显著,而杜英林乔木根系生物量则显著大于木荷-青冈栎林。可见,杜英林细根数量多、生物量大,根系分泌物也较多,且细根系周转速率快,有助于细根系死亡后释放大量的有机碳到土壤中,因此有利于杜英人工林土壤有机碳的积累。

3.3 林分生态系统碳储量

灌木林、木荷-青冈栎林和杜英林生态系统碳储量分别为 54.12 、 108.74 和 $146.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,用乡土阔叶树种改造退化灌木林生长 11 年后,显著增加了生态系统碳的积累,林分立地条件也明显改善。两种人工林生态系统碳储量均高于中国亚热带地区马尾松幼林碳储量($99.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和杉木幼林碳储量($71.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$),杜英林碳储量接近于杉木中

龄林碳储量($150.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[42]。本研究区人工林在幼林期已表现出较好的碳蓄积能力,并且人工林植被对土壤有机碳的改善作用还会随着林分年龄的增加而逐渐增加。因此,利用乡土阔叶树种加大对退化灌木林的改造对于提高森林生态系统碳储量

和碳密度具有重要意义。杜英作为亚热带地区珍贵乡土阔叶树种,早期生长速度较快,可以尽快促使林分郁闭,并对土壤有很好的改良作用,固碳能力较高,是增加森林碳汇、营造生态公益林的理想树种。

参考文献:

- [1] MALHI Y, BALDOCCHI D D, JARVIS P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1999, **22**(6): 715—740.
- [2] YAMAGATA Y, ALEXANDROV G A. Would forestation alleviate the burden of emission reduction? An assessment of the future carbon Sink from ARD activities[J]. *Climate Policy*, 2001, **1**(1): 27—40.
- [3] IPCC. Land Use, Land Use Change and Forestry. Special Report, Inter-Governmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, UK, 2000.
- [4] TIAN M H(田明华), WANG F W(王富伟), CHENG S Y(程思瑶), et al. On several issues of China efforts to increase forest carbon sinks[J]. *Forestry Economics*(林业经济), 2011, (7): 28—32(in Chinese).
- [5] JIN X H(金小华), LIU H G(刘宏纲), et al. A study on the productivity of secondary shrub thicket and shrub-grassland in Yixian County, Anhui Province[J]. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*(植物生态学与地植物学学报), 1990, **14**(3): 267—273(in Chinese).
- [6] PANG X Y(庞学勇), BAO W K(包维楷), et al. Effect of low-quality and benefit forest improvement on soil physical properties in middle-mountain of upper reaches of Minjiang River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*(水土保持通报), 2005, **25**(5): 12—16(in Chinese).
- [7] LI H Y(李红云), LI H P(李焕平), YANG J H(杨吉华), et al. Study on soil physical properties and anti-erosion capability under four kinds of shrubbery[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 2006, **20**(3): 13—16(in Chinese).
- [8] LAL R. Forest soils and carbon sequestration[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **220**(1): 242—258.
- [9] SHI J(史 军), LIU J Y(刘纪远), GAO ZH Q(高志强), et al. Research advances of the influence of afforestation on terrestrial carbon sink[J]. *Progress in Geography*(地理科学进展), 2004, **23**(2): 58—67(in Chinese).
- [10] CARNEVALE N J, MONTAGNINI F. Facilitating regeneration of secondary forests with the use of mixed and pure plantations of indigenous tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, **163**(1): 217—227.
- [11] HUANG Y CH(黄永诚). Analysis on soil fertility after converting low-quality shrub forest into *Betula luminifera* plantation[J]. *Forestry Prospects and Design*(林业勘探设计), 2009, (1): 80—83(in Chinese).
- [12] WANG CH M(王春梅), SHAO B(邵 彬), WANG R N(王汝南). Carbon sequestration potential of ecosystem of two main tree species in Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2010, **30**(7): 1 764—1 772(in Chinese).
- [13] PENG S L, HOU Y P, CHEN B M. Vegetation restoration and its effects on carbon balance in Guangdong Province, China[J]. *Restoration Ecology*, 2009, **17**(4): 487—494.
- [14] HU Y L(胡亚林), WANG S L(汪思龙), et al. Effects of replacing natural secondary broad-leaved forest with *Cunninghamia lanceolata* plantation on soil biological activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2005, **16**(8): 1 411—1 416(in Chinese).
- [15] MO J M(莫江明), FANG Y T(方运霆), PENG SH L(彭少麟), et al. Carbon accumulation and allocation of lower subtropical evergreen broad-leaved forests in a MAB reserve of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2003, **23**(10): 1 970—1 976(in Chinese).
- [16] LI Q(李 强), MA M D(马明东), LIU Y J(刘跃建), et al. Study on soil carbon and nutrients pools of several evergreen broad-leaved forest types in Northwest Sichuan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 2007, **21**(6): 114—117(in Chinese).
- [17] 林 伟. 井冈山森林生态系统植被碳密度研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- [18] WANG B(王 兵), YANG Q P(杨清培), GUO Q R(郭起荣), et al. Carbon storage and allocation of *Phyllostachys edulis* forest and evergreen broad-leaved forest in Dagangshan Mountain, Jiangxi[J]. *Guihaia*(广西植物), 2011, **31**(3): 342—348(in Chinese).
- [19] LIU L J(刘龙聚), SHI L SH(石兰生), GUO D L(郭德龙). Primary study of conversion from low-quality shrub forest to high-yield *Larix gmelinii* plantation[J]. *Modernizing Agriculture*(现代化农业) 2006, **5**(34): 40—41(in Chinese).
- [20] PANG X Y(庞学勇), BAO W K(包维楷), et al. Effect of improvement of low-quality and benefit forest on hydrological process of litter in Middle-Mountain of upper reaches of Minjiang River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 2005, **9**(4): 119—122(in Chinese).
- [21] SHANG S Y(商素云), LI Y F(李永夫), JIANG P K(姜培坤), et al. Effects of conversion from native shrub forest to Chinese chestnut plantation on soil carbon and nitrogen pools[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2012, **23**(3): 659—665(in Chinese).
- [22] HOUGHTON R A, HACKLER J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia[J]. *Global Change Biology*, 1999, **5**(4): 481—492.
- [23] MOTAVALLI P P, DISCEKICI H, KUHN J. The impact of land clearing and agricultural practices on soil organic C fractions and CO₂ efflux in the Northern Guam aquifer[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, **79**(1): 17—27.
- [24] BAYRAMZADEH V. Does tree species composition control the soil carbon stocks of the Hyrcanian forest in the Northern Iran? (A case study in Guilan Province, Iran)[J]. *Journal of Forestry Research*, 2014, **25**(1): 143—146.
- [25] GIARDINA C P, RYAN M G, HUBBARD R M, et al. Tree species and soil textural controls on carbon and nitrogen mineralization rates [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(4): 1 272—1 279.

- [26] GAO Y, CHENG J, MA Z, *et al.* Carbon storage in biomass, litter, and soil of different plantations in a semiarid temperate region of Northwest China[J]. *Annals of Forest Science*, 2014, **71**(4): 427–435.
- [27] 冯宗炜, 王效科, 吴 刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [28] 杨同辉. 浙江天童国家森林公园常绿阔叶林生物量研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [29] 国家林业局. LY/T 1237-1999. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S], 1999.
- [30] LI J Y(李家永), YUAN X H(袁小华). A comparative study on organic carbon storage in different land-use systems in Red earth Hilly area[J]. *Resources Science*(资源科学), 2001, **23**(5): 73–76(in Chinese).
- [31] LI K R(李克让), WANG SH Q(王绍强), CAO M K(曹明奎). Vegetation and soil carbon storage in China[J]. *Science in China*(Series D)(中国科学 D 辑), 2003, **33**(1): 72–80(in Chinese).
- [32] HUANG Q L(黄清麟), ZHENG Q R(郑群瑞), RUAN X R(阮学瑞). A study on structure and productivity of *Cyclobalanopsis chungii* sprout stand[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*(福建林学院学报), 1995, **15**(2): 107–111(in Chinese).
- [33] SU ZH P(苏治平). Analyse on growth conditions of *Sylvestral elaeocarpus* plantation[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*(福建林学院学报), 2000, **20**(1): 38–41(in Chinese).
- [34] ABDALLAH F, CHAIEB M. The influence of trees on nutrients, water, light availability and understorey vegetation in an arid environment[J]. *Applied Vegetation Science*, 2012, **15**(4): 501–512.
- [35] ARX G V, DOBBERTIN M, REBETEZ M. Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, (166–167): 144–155.
- [36] HOLST T, MAYER H, SCHINDLER D. Microclimate within beech stands-part II: thermal conditions[J]. *European Journal of Forest Research*, 2004, **123**(1): 13–28.
- [37] YE SH M(叶绍明), LONG T(龙 滔), *et al.* Carbon storage and spatial distributions characteristic of stratified mixed stands of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium*[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*(江西农业学报), 2010, **32**(4): 735–742(in Chinese).
- [38] LIU E(刘 恩), WANG H(王 晖), LIU SH R(刘世荣). Characteristics of carbon storage and sequestration in different age beech (*Castanopsis hystrix*) plantations in south subtropical area of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2012, **23**(2): 335–340(in Chinese).
- [39] QIAN Y F(钱逸凡), YI L T(伊力塔), ZHANG CH(张 超), *et al.* Biomass and carbon storage of public service forests in the central area of Zhejiang Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2013, **49**(5): 17–23(in Chinese).
- [40] ZHOU Y R(周玉荣), YU ZH L(于振良), ZHAO SH D(赵士洞). Carbon storage and budget of major Chinese forest types[J]. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 2000, **24**(5): 518–522(in Chinese).
- [41] HE B(何 斌), HUANG SH X(黄寿先), ZHAO L J(招礼军), *et al.* Dynamic characteristics of carbon accumulation in *Taiwania flousiana* plantation ecosystem[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2009, **45**(9): 151–157(in Chinese).
- [42] TAO Y H(陶玉华), FENG J CH(冯金朝), *et al.* Carbon storage and distribution of masson pine, Chinese fir and *Eucalyptus* plantations at Liuzhou, Guangxi Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*(生态环境学报), 2011, **20**(11): 1 608–1 613(in Chinese).
- [43] WU Y C(吴亚丛), LI ZH C(李正才), CHENG C F(程彩芳), *et al.* Effects of understory removal on forest carbon storage in *Cinnamomum camphora* plantation ecosystem[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2013, **37**(2): 142–149(in Chinese).
- [44] WANG SH(王 适), WU Y B(吴永波), CHEN J(陈 杰), *et al.* Carbon storage of different plantations in Chongming Ecological Agriculture Park in Shanghai[J]. *Journal of Northwest Forestry University*(西北林学院学报), 2013, **28**(3): 53–56(in Chinese).
- [45] LÜ J L(吕家珑), ZHANG Y P(张一平), WANG X D(王旭东), *et al.* Protective effect of agri-land ecosystem for soil fertility[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2001, **21**(4): 613–616(in Chinese).
- [46] PAUL K I, POLGLASE P J, NYAKUENGAMA J G, *et al.* Change in soil carbon following afforestation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, **168**(1): 241–257.
- [47] VESTERDAL L, RITTER E, GUNDERSEN P. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, **169**(1): 137–147.
- [48] BÁRCENA T G, GUNDERSEN P, VESTERDAL L. Afforestation effects on SOC in former cropland: oak and spruce chronosequences resampled after 13 years[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(9): 2 938–2 952.
- [49] ZINN Y L, RESCK D V S, DA SILVA J E. Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, **166**(1): 285–294.
- [50] BÁRCENA T G, KLÆR L P, VESTERDAL L, *et al.* Soil carbon stock change following afforestation in Northern Europe: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(8): 2 393–2 405.
- [51] GRIGAL D F, BERGUSON W E. Soil carbon changes associated with short-rotation systems[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1998, **14**(4): 371–377.
- [52] RUSSELL A E, RAICH J W, VALVERDE-BARRANTES O J, *et al.* Tree species effects on soil properties in experimental plantations in tropical moist forest[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**(4): 1 389–1 397.
- [53] LUGO A E, BROWN S. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon[J]. *Plant and Soil*, 1993, **149**(1): 27–41.
- [54] BUSSE M D, COCHRAN P H, BARRETT J W. Changes in ponderosa pine site productivity following removal of understory vegetation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**(6): 1 614–1 621.