

不同林龄千年桐人工林的碳含量和 碳储量及碳库分配格局

洪滔¹, 何晨阳¹, 黄贝佳¹, 陈灿¹, 李键¹, 林晗¹, 吴承祯^{2,①}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 武夷学院, 福建 南平 354300)

摘要: 为了明晰福建省千年桐(*Vernicia montana* Lour.)人工林碳储量的变化规律及碳库分配格局,采用空间代替时间的方式,对南平市林龄2、3、5、7和9 a的千年桐人工林乔木层(包括树干、树枝、树叶和树根)、灌木层、草本层、凋落物层及0~100 cm土层的碳含量和碳储量及其所占比例进行了比较,并对各林分的总碳储量及分配格局进行了分析。结果表明:林龄2 a的林分中树根碳含量最高(584.63 g·kg⁻¹),树叶碳含量略低;林龄3、5和9 a的林分中树干碳含量最高,分别为536.34、406.44和636.95 g·kg⁻¹;林龄7 a的林分中树干、树枝、树叶和树根的碳含量差异较小。并且,林龄2、3和9 a的林分中乔木层碳含量最高,分别为537.68、467.77和529.35 g·kg⁻¹。各土层碳含量的平均值为11.30~21.42 g·kg⁻¹,总体上随林龄增长而升高。各林分的总碳储量为105.60~214.60 t·hm⁻²,总体上随林龄增长而升高。各林分的植被层碳储量为23.89~85.13 t·hm⁻²,占总碳储量的17.27%~39.67%,其中,乔木层、灌木层、草本层和凋落物层的碳储量分别为21.11~75.78、0.96~2.46、0.27~0.56和1.55~6.33 t·hm⁻²,分别占总碳储量的14.60%~35.31%、0.72%~1.14%、0.22%~0.26%和1.46%~2.95%。各林分的土壤碳储量为81.71~129.47 t·hm⁻²,占总碳储量的60.34%~82.74%。随林龄增长,除林龄2 a的林分外,其余林龄林分的土壤碳储量占总碳储量的比例降低,而植被层碳储量占总碳储量的比例却升高。综上所述,千年桐人工林碳储量分配比例从大到小依次为土壤、乔木层、凋落物层、灌木层、草本层,且总碳储量总体上随林龄增长而升高。

关键词: 千年桐; 林龄; 碳含量; 碳储量; 分配格局

中图分类号: S718.55⁺1.2; S792.99 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2021)01-0009-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2021.01.02

Carbon content, carbon storage and distribution pattern of carbon pool of *Vernicia montana* plantation with different stand ages HONG Tao¹, HE Chenyang¹, HUANG Beijia¹, CHEN Can¹, LI Jian¹, LIN Han¹, WU Chengzhen^{2,①}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Wuyi University, Nanping 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2021, 30(1): 9-16

Abstract: In order to clarify the change law of carbon storage and the distribution pattern of carbon pool of *Vernicia montana* Lour. plantation in Fujian Province, the carbon content, carbon storage and its proportion in arbor layer (containing trunk, branch, leaf and root), shrub layer, herb layer, litter layer and 0-100 cm soil layer of *V. montana* plantation with stand age of 2, 3, 5, 7 and 9 a in Nanping City were analyzed by using space instead of time, and the total carbon storage and distribution pattern of each stand were analyzed. The results show that the carbon content in root of stand with stand age of 2 a is the highest (584.63 g·kg⁻¹), that in leaf is slightly lower; the carbon content in trunk of stands with stand age of 3, 5 and 9 a is the highest, which is 536.34, 406.44 and 636.95 g·kg⁻¹, respectively; the

收稿日期: 2020-07-30

基金项目: 国家“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0601304)

作者简介: 洪滔(1978—),男,福建福州人,博士,副教授,主要从事森林生态与森林经理方向的研究。

①通信作者 E-mail: fjwcz@126.com

引用格式: 洪滔, 何晨阳, 黄贝佳, 等. 不同林龄千年桐人工林的碳含量和碳储量及碳库分配格局[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(1): 9-16.

difference in carbon content in trunk, branch, leaf and root of stand with stand age of 7 a is small. In addition, the carbon content in arbor of stands with stand age of 2, 3 and 9 a is the highest, which is 537.68, 467.77 and 529.35 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The average carbon content in each soil layer is 11.30–21.42 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and generally increases with the increase of stand age. The total carbon storage of each stand is 105.60–214.60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and generally increases with the increase of stand age. The carbon storage of vegetation layer of each stand is 23.89–85.13 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, accounting for 17.27%–39.67% of the total carbon storage, in which, the carbon storage of arbor, shrub, herb and litter layers is 21.11–75.78, 0.96–2.46, 0.27–0.56 and 1.55–6.33 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, accounting for 14.60%–35.31%, 0.72%–1.14%, 0.22%–0.26% and 1.46%–2.95% of the total carbon storage, respectively. The carbon storage of soil of each stand is 81.71–129.47 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, accounting for 60.34%–82.74% of the total carbon storage. With the increase of stand age, except for stand with stand age of 2 a, the proportion of carbon storage of soil in total carbon storage of stands with other stands decreases, while that of carbon storage of vegetation layer in total carbon storage increases. In summary, the distribution proportion of carbon storage of *V. montana* plantation from big to small is soil, arbor layer, litter layer, shrub layer, herb layer, and the total carbon storage generally increases with the increase of stand age.

Key words: *Vernicia montana* Lour.; stand age; carbon content; carbon storage; distribution pattern

科学家预测,由于大气 CO_2 量持续升高,21 世纪末全球地表平均温度将上升 $1.0\text{ }^\circ\text{C} \sim 3.7\text{ }^\circ\text{C}$ [1]。研究发现,森林生态系统碳固存对全球碳循环至关重要 [2],可在一定程度上缓解全球变暖 [3]。森林生态系统的碳固存格局与森林的演替发育过程密切相关 [4],其近 10 年的净碳固存取决于林龄差异 [5]。随着林龄增长,森林植被碳库通常呈增加趋势 [6],而土壤碳库却未增大 [7]。营造人工林是改善全球生态环境的主要策略 [8–10],掌握人工林生态系统碳库动态是预测及评价碳中和效果的关键。目前,国内关于人工林碳库的研究主要集中在温带人工林上 [11–14],而对亚热带人工林生态系统碳库及分配格局的研究却相对较少,且主要围绕杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] [15–16]、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) [17] 和桉树 (*Eucalyptus robusta* Smith) [18] 展开。

千年桐 (*Vernicia montana* Lour.) 又名木油桐、皱果桐,隶属于大戟科 (Euphorbiaceae) 油桐属 (*Vernicia* Lour.), 为高大落叶乔木,具有生长速度快、耐贫瘠和抗病性强等特点 [19] 6–7。千年桐是中国南方的本土生物质能源树种,其种仁的含油率高达 60%–70%,可开发利用为生物质柴油及其他工业原料,在工业、军事及能源等领域也具有广泛应用价值,其木材还是中纤维的优良原料 [19] 7–8。随着千年桐栽植面积不断增大,该种日益受到研究者的重视,已经在生物量积累估算 [20]、扦插繁殖 [21]、内生真菌作用 [22]、林分化学计量特征 [23]、根部特征 [24]、不同种源生理特征差异 [25]、胁迫反应 [26–27] 和桐油利用 [28] 等方面开展了相关研

究。千年桐具有速生性,在碳固存方面具有重要的生态服务价值,但目前尚缺乏对其人工林碳库的量化研究,导致无法掌握千年桐人工林演替发育过程中的碳固存动态,从而无从评价其碳汇潜力。

为了明晰福建省千年桐人工林碳储量的变化规律及碳库分配格局,以空间代替时间的方式,选取福建省南平市林龄 2、3、5、7 和 9 a 的千年桐人工林为研究对象,对不同林龄乔木层 (包括树干、树枝、树叶和树根)、灌木层、草本层、凋落物层和土壤 (包括 0~5、5~10、10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层) 的碳含量和碳储量及所占比例进行了比较,并对各林分的总碳储量及分配格局进行了比较,以期在国内森林生态系统的碳汇核算、计量及动态模拟提供基础数据。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

研究地设在福建省南平市建阳区溪东国有林场内。该林场位于武夷山南麓,具体地理坐标为东经 $116^\circ 23' \sim 118^\circ 38'$ 、北纬 $25^\circ 10' \sim 27^\circ 43'$,地貌类型为山地丘陵,山体以花岗岩为主,土壤为红壤,土层较薄。区域气候为中亚热带季风湿润气候,夏长冬短,温差大,年均温 $18.1\text{ }^\circ\text{C}$,年均空气相对湿度 74%,年均降水量 1 742 mm,年均日照时数 1 800 h,无霜期 280 d。植被类型主要为亚热带常绿阔叶林,还有针叶林、针阔混交林、灌丛和草甸等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 由于千年桐生长速度快, 生物量积累主要集中在幼龄(林龄 2~3 a)至成龄(林龄 9 a)阶段, 因此, 采取空间代替时间的方式, 在林龄 2、3、5、7 和 9 a 的千年桐人工林纯林中划分样地。依据千年桐人工林纯林的造林小班表, 在每个林龄林分内设

置 1 个海拔、坡向、坡度、坡位、土壤条件和群落类型相近的样地, 样地面积均为 20 m×20 m。对各样地内的千年桐植株进行每木检尺, 使用激光测高仪(精度 0.01 m)测定树高, 使用围径尺(精度 0.01 cm)测量胸径, 并计算每个样地内千年桐植株的平均树高和平均胸径。样地概况见表 1。

表 1 不同林龄千年桐人工林纯林的样地概况

Table 1 Plot overview of pure forest of *Vernicia montana* Lour. plantation with different stand ages

| 林龄/a Stand age | 经度 Longitude | 纬度 Latitude | 海拔/m Altitude | 坡向 Slope aspect | 坡度/(°) Slope | 坡位 Slope position | 密度/hm ⁻² Density | H/m ¹⁾ | DBH/cm ¹⁾ |
|-------------------|-----------------|----------------|------------------|--------------------|-----------------|----------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------|
| 2 | E118°27'06" | N26°14'36" | 254 | 南 South | 13 | 中 Middle | 1 562.7 | 1.93 | 4.17 |
| 3 | E116°39'03" | N25°10'22" | 255 | 东南 Southeast | 21 | 下 Lower | 1 440.4 | 3.78 | 5.21 |
| 5 | E116°23'01" | N26°08'19" | 225 | 西南 Southwest | 19 | 中下 Middle and lower | 945.4 | 5.77 | 6.26 |
| 7 | E118°21'05" | N27°19'03" | 221 | 西南 Southwest | 25 | 中下 Middle and lower | 780.6 | 9.08 | 8.76 |
| 9 | E117°48'08" | N27°16'32" | 213 | 南 South | 15 | 中下 Middle and lower | 615.1 | 10.19 | 11.42 |

¹⁾H: 平均树高 Average height; DBH: 平均胸径 Average diameter at breast height.

5 个样地的主要灌木种类有九节 (*Psychotria asiatica* Wall.)、柏拉木 (*Blastus cochinchinensis* Lour.)、亮叶猴耳环 [*Archidendron lucidum* (Benth) I. C. Nielsen]、西南粗叶木 (*Lasianthus henryi* Hutchins.)、山矾 (*Symplocos sumuntia* Buch.-Ham. ex D. Don)、齿叶黄皮 (*Clausena dunniana* Lévl.)、满山红 (*Rhododendron mariesii* Hemsl. et Wils.) 和变叶树参 [*Dendropanax proteus* (Champ.) Benth.] 等, 主要草本种类有五节芒 [*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum et Laut.]、蕺菜 (*Houttuynia cordata* Thunb.)、山麦冬 [*Liriope spicata* (Thunb.) Lour.]、芒萁 [*Dicranopteris pedata* (Houtt.) Nakai.]、吉祥草 [*Reineckea carnea* (Andr.) Kunth]、马蹄金 (*Dichondra micrantha* Urban) 和络石 [*Trachelospermum jasminoides* (Lindl.) Lem.] 等。

1.2.2 采样方法 于当年 7 月选择天气晴朗日进行采样。采用平均标准木法^[29]在每个样地内选择 4 株接近平均胸径的千年桐标准木, 采集全株, 分成树干、树枝、树叶和树根 4 个部分; 将同株同一部位的样品收集在一起, 清洁后分别称量各部位的单株鲜质量, 带回实验室, 待测。

在每个样地内随机设置 1 个面积 5 m×5 m 的灌木样方, 收集样方内所有灌木(包括地上和地下部分), 清洁后称量鲜质量, 带回实验室, 待测。

在每个样地内沿着对角线等距离设置 5 个面积 1 m×1 m 的草本样方, 分别收集样方内所有的草本

(包括地上和地下部分)和凋落物, 清洁后分别称量鲜质量, 带回实验室, 待测。

在每个样地内按照“S”形布设 7 个采样点, 用 100 cm³环刀横向垂直挖取土样, 每个采样点均挖取 0~5、5~10、10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 7 个土层的土样, 每个土层挖取土样约 500 g。分别测定土壤容重, 将每个样地内同一土层的土样混匀, 称量鲜质量, 带回实验室, 待测。

1.2.3 碳含量测定及碳储量估算 将乔木层(包括树干、树枝、树叶和树根 4 个部位)、灌木层、草本层和凋落物层样品在 85 °C 条件下烘干至恒质量, 称量干质量后粉碎, 采用 LY/T 1237—1999 中的重铬酸钾氧化-外加热法测定碳含量。每个样品重复测定 3 次, 结果取平均值。根据测定结果, 参照王振鹏等^[7]的方法分别估算各层次的碳储量, 并计算植被层碳储量(即乔木层、灌木层、草本层和凋落物层碳储量的总和)及各层次碳储量所占比例。

将各土层的土样在 105 °C 条件下烘干至恒质量, 称量干质量后碾碎并过 100 目筛, 同样采用 LY/T 1237—1999 中的重铬酸钾氧化-外加热法测定碳含量。每个土样重复测定 3 次, 结果取平均值。根据测定结果, 参照王振鹏等^[7]的方法估算各土层的碳储量, 并计算土壤碳储量及各土层碳储量所占比例。

1.3 数据处理及分析

采用 EXCEL 2003 软件对实验数据进行处理和分析, 并制表。

2 结果和分析

2.1 不同林龄千年桐人工林碳含量的比较

2.1.1 不同层次碳含量的比较 不同林龄千年桐人工林乔木层、灌木层、草本层和凋落物层碳含量的比较结果见表2。由表2可见:乔木层中,树干和树枝的碳含量均在林龄9 a的林分中最高,而树叶和树根的碳含量则在林龄2 a的林分中最高。林龄2 a的林分中,树根碳含量最高(584.63 g·kg⁻¹),树叶碳含量次之,较树根碳含量低0.66%;林龄3、5和9 a的林分中,树干碳含量最高(分别为536.34、406.44和636.95 g·kg⁻¹),树根、树叶和树根碳含量分别次之,较树干碳含量分别低29.62%、2.44%和17.71%;林龄7 a的林分中,树叶碳含量最高(482.40 g·kg⁻¹),但与树

干、树枝和树根的碳含量差异较小。

由表2还可见:乔木层碳含量在林龄2 a的林分中最高(537.68 g·kg⁻¹),在林龄9 a的林分中次之,在林龄5 a的林分中最低。灌木层、草本层和凋落物层碳含量总体上随林龄增长而升高,其中,灌木层碳含量从326.97 g·kg⁻¹增至403.72 g·kg⁻¹,凋落物层碳含量从326.17 g·kg⁻¹增至452.52 g·kg⁻¹,而草本层碳含量从300.05 g·kg⁻¹增至363.04 g·kg⁻¹后略下降。林龄2、3和9 a的林分中乔木层碳含量均最高,其中,林龄2 a的林分中,乔木层碳含量明显高于灌木层、草本层和凋落物层,且灌木层和凋落物层碳含量相近,略高于草本层;林龄3和9 a的林分中,乔木层和凋落物层碳含量明显高于灌木层和草本层,且乔木层碳含量高于凋落物层,灌木层碳含量高于草本层。

表2 不同林龄千年桐人工林乔木层、灌木层、草本层和凋落物层碳含量的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on carbon content in arbor, shrub, herb and litter layers of *Vernicia montana* Lour. plantation with different stand ages ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

| 林龄/a Stand age | 乔木层各部位碳含量/(g·kg ⁻¹) Carbon content in each part of arbor layer | | | | | C1/(g·kg ⁻¹) | C2/(g·kg ⁻¹) | C3/(g·kg ⁻¹) |
|----------------------|---|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 树干 Trunk | 树枝 Branch | 树叶 Leaf | 树根 Root | 均值 Average | | | |
| 2 | 463.00±47.62 | 489.00±63.21 | 580.76±76.83 | 584.63±31.83 | 537.68±73.23 | 326.97±41.42 | 300.05±60.82 | 326.17±33.60 |
| 3 | 536.34±53.84 | 314.92±70.12 | 367.27±59.39 | 377.49±35.75 | 467.77±103.14 | 349.82±26.73 | 329.89±45.93 | 388.63±27.98 |
| 5 | 406.44±73.65 | 352.23±44.67 | 396.52±56.22 | 367.89±29.82 | 380.77±50.19 | 396.69±46.35 | 350.16±42.71 | 414.06±51.52 |
| 7 | 461.25±63.19 | 457.75±61.85 | 482.40±41.76 | 469.67±62.39 | 399.00±50.71 | 398.13±20.96 | 363.04±30.99 | 425.22±32.41 |
| 9 | 636.95±56.64 | 515.32±73.18 | 474.34±46.07 | 524.12±60.62 | 529.35±79.26 | 403.72±65.51 | 357.59±42.87 | 452.52±48.63 |

¹⁾ C1: 灌木层碳含量 Carbon content in shrub layer; C2: 草本层碳含量 Carbon content in herb layer; C3: 凋落物层碳含量 Carbon content in litter layer.

2.1.2 不同土层碳含量的比较 不同林龄千年桐人工林各土层碳含量的比较结果见表3。由表3可见:供试7个土层碳含量的平均值在林龄2 a的林分中最低(11.30 g·kg⁻¹),在林龄9 a的林分中最高(21.42 g·kg⁻¹),且总体上随林龄增长而升高。林龄9 a的林分中,0~5、5~10、10~20、20~40、40~60、

60~80和80~100 cm土层的碳含量分别是林龄2 a的林分中相应土层碳含量的3.18、3.62、1.41、1.77、1.32、1.25和1.44倍。总体来看,林龄2和3 a的林分中不同土层碳含量随土层加深无明显的变化规律,而林龄5、7和9 a的林分中不同土层碳含量却随土层加深而下降。

表3 不同林龄千年桐人工林各土层碳含量的比较($\bar{X}\pm SD$)

Table 3 Comparison on carbon content in each soil layer of *Vernicia montana* Lour. plantation with different stand ages ($\bar{X}\pm SD$)

| 林龄/a Stand age | 各土层碳含量/(g·kg ⁻¹) Carbon content in each soil layer | | | | | | | 均值 Average |
|-------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0-5 cm | 5-10 cm | 10-20 cm | 20-40 cm | 40-60 cm | 60-80 cm | 80-100 cm | |
| 2 | 11.26±0.22 | 7.80±0.22 | 19.19±1.22 | 10.29±1.17 | 10.62±1.08 | 10.70±1.09 | 9.24±1.13 | 11.30±1.06 |
| 3 | 27.53±2.23 | 27.63±2.23 | 8.44±0.23 | 15.76±1.11 | 15.03±1.18 | 23.97±1.08 | 10.25±1.09 | 18.37±1.96 |
| 5 | 26.81±1.41 | 32.60±3.41 | 23.74±2.41 | 18.67±1.08 | 10.61±1.09 | 9.97±1.17 | 11.13±1.07 | 19.07±1.95 |
| 7 | 26.96±1.26 | 25.86±2.26 | 17.22±1.26 | 18.96±1.13 | 20.70±1.13 | 8.30±1.12 | 17.08±1.14 | 19.03±1.32 |
| 9 | 35.81±3.47 | 28.24±2.45 | 27.02±1.57 | 18.19±1.08 | 14.06±1.07 | 13.35±1.13 | 13.32±1.12 | 21.42±1.62 |

2.2 不同林龄千年桐人工林碳储量的比较

2.2.1 不同层次碳储量的比较 不同林龄千年桐人工林乔木层、灌木层、草本层和凋落物层碳储量的比较结果见表4。由表4可见:总体来看,树干、树枝、树叶和树根的碳储量随林龄增长而升高,但所占比例无明显变化规律。林龄9 a的林分中,树干、树枝、树叶和树根的碳储量分别是林龄2 a的林分中相应部位碳储量的4.80、3.26、2.68和2.79倍。林龄2、3和5 a的林分中,树干碳储量及所占比例均最高(碳储量分别为7.35、10.68和9.46 t·hm⁻²,所占比例分别为30.77%、41.83%和35.04%),树根碳储量及所占比例次之,树叶碳储量及所占比例均最低(碳储量分别为3.18、2.43和3.19 t·hm⁻²,所占比例分别为13.31%、9.52%和11.60%);而林龄7和9 a的林分中,树干碳储量及所占比例均最高(碳储量分别为20.95和35.30 t·hm⁻²,所占比例分别为35.38%和41.47%),树枝碳储量及所占比例次之,树叶碳储量及所占比例均最低(碳储量分别为5.71和8.53 t·hm⁻²,所占比例分别为9.64%和10.02%)。

由表4还可见:总体来看,乔木层、灌木层、草本层和凋落物层碳储量均随林龄增长而升高,但所占比

例随林龄增长先升高后降低。林龄9 a的林分中乔木层、灌木层、草本层和凋落物层的碳储量分别是林龄2 a的林分中相应层次碳储量的3.59、2.56、2.07和4.08倍。各林龄林分中乔木层的碳储量及所占比例均最高(碳储量为21.11~75.78 t·hm⁻²,所占比例均在80%以上),凋落物层碳储量及所占比例次之,草本层碳储量及所占比例均最低(碳储量为0.27~0.56 t·hm⁻²,所占比例均在2%以下)。

对供试5个林龄千年桐人工林植被层碳储量(即乔木层、灌木层、草本层和凋落物层碳储量的总和)进行统计分析,结果(表4)显示:林龄2、3、5、7和9 a的林分中植被层碳储量分别为23.89、25.53、27.51、59.22和85.13 t·hm⁻²,表现为随林龄增长而升高。

2.2.2 不同土层碳储量的比较 不同林龄千年桐人工林各土层碳储量的比较结果见表5。由表5可见:土壤碳储量在林龄2 a的林分中最低(81.71 t·hm⁻²),在林龄9 a的林分中最高(129.47 t·hm⁻²),且总体上随林龄增长而升高;但各土层碳储量所占比例却无明显的变化规律。各林龄林分中不同土层碳储量及所占比例随土层加深无明显的变化规律,但总体来看,0~5和5~10 cm土层碳储量及

表4 不同林龄千年桐人工林乔木层、灌木层、草本层和凋落物层碳储量的比较¹⁾

Table 4 Comparison on carbon storage of arbor, shrub, herb and litter layers of *Vernicia montana* Lour. plantation with different stand ages¹⁾

| 林龄/a Stand age | 乔木层各部位碳储量/(t·hm ⁻²) Carbon storage of each part of arbor layer | | | | | S1/(t·hm ⁻²) | S2/(t·hm ⁻²) | S3/(t·hm ⁻²) | S/(t·hm ⁻²) |
|----------------------|---|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| | 树干 Trunk | 树枝 Branch | 树叶 Leaf | 树根 Root | 合计 Total | | | | |
| 2 | 7.35(30.77%) | 5.13(21.47%) | 3.18(13.31%) | 5.45(22.81%) | 21.11(88.36%) | 0.96(4.02%) | 0.27(1.13%) | 1.55(6.49%) | 23.89 |
| 3 | 10.68(41.83%) | 4.08(15.98%) | 2.43(9.52%) | 4.41(17.27%) | 21.60(84.61%) | 1.06(4.15%) | 0.32(1.25%) | 2.55(9.99%) | 25.53 |
| 5 | 9.64(35.04%) | 4.71(17.12%) | 3.19(11.60%) | 4.97(18.07%) | 22.51(81.82%) | 1.41(5.13%) | 0.36(1.31%) | 3.23(11.74%) | 27.51 |
| 7 | 20.95(35.38%) | 13.62(23.00%) | 5.71(9.64%) | 12.68(21.41%) | 52.96(89.43%) | 1.91(3.23%) | 0.49(0.83%) | 3.86(6.52%) | 59.22 |
| 9 | 35.30(41.47%) | 16.73(19.65%) | 8.53(10.02%) | 15.22(17.88%) | 75.78(89.02%) | 2.46(2.89%) | 0.56(0.66%) | 6.33(7.44%) | 85.13 |

¹⁾ S1: 灌木层碳储量 Carbon storage of shrub layer; S2: 草本层碳储量 Carbon storage of herb layer; S3: 凋落物层碳储量 Carbon storage of litter layer; S: 植被层碳储量(乔木层、灌木层、草本层和凋落物层碳储量的总和) Carbon storage of vegetation layer (sum of carbon storage of arbor, shrub, herb and litter layers). 括号中百分数表示碳储量所占比例 Percentages in the brackets represent the proportion of carbon storage.

表5 不同林龄千年桐人工林各土层碳储量的比较

Table 5 Comparison on carbon storage of each soil layer of *Vernicia montana* Lour. plantation with different stand ages

| 林龄/a Stand age | 各土层碳储量/(t·hm ⁻²) ¹⁾ Carbon storage of each soil layer ¹⁾ | | | | | | | 合计 Total |
|-------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|
| | 0-5 cm | 5-10 cm | 10-20 cm | 20-40 cm | 40-60 cm | 60-80 cm | 80-100 cm | |
| 2 | 3.65(4.47%) | 2.80(3.43%) | 14.20(17.38%) | 14.45(17.68%) | 15.38(18.82%) | 16.52(20.22%) | 14.71(18.00%) | 81.71 |
| 3 | 8.92(7.29%) | 9.93(8.12%) | 6.25(5.11%) | 22.13(18.09%) | 21.76(17.79%) | 37.01(30.26%) | 16.32(13.34%) | 122.32 |
| 5 | 8.69(7.71%) | 11.72(10.40%) | 17.57(15.59%) | 26.21(23.27%) | 15.36(13.64%) | 15.39(13.66%) | 17.72(15.73%) | 112.66 |
| 7 | 8.74(6.86%) | 9.30(7.30%) | 12.74(10.00%) | 26.62(20.90%) | 29.97(23.53%) | 12.82(10.06%) | 27.19(21.35%) | 127.38 |
| 9 | 11.60(8.96%) | 10.15(7.84%) | 20.00(15.44%) | 25.54(19.73%) | 20.36(15.73%) | 20.61(15.92%) | 21.21(16.38%) | 129.47 |

¹⁾ 括号中百分数表示碳储量所占比例 Percentages in the brackets represent the proportion of carbon storage.

所占比例较低,而10~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm土层碳储量及所占比例却较高。

2.3 不同林龄千年桐人工林总碳储量及碳库分配格局

不同林龄千年桐人工林总碳储量及其分配比例见表6。由表6可见:林龄2、3、5、7和9 a的林分总碳储量分别为105.60、147.85、140.17、186.60和214.60 t·hm⁻²。不同林龄林分中,土壤碳储量占总碳储量的比例最高(60.34%~82.74%),乔木层碳储量占总碳储量的比例较高(14.60%~35.31%),凋落物层碳储量占总碳储量的比例较低(1.46%~2.95%),

灌木层碳储量占总碳储量的比例更低(0.72%~1.14%),草本层碳储量占总碳储量的比例最低(0.22%~0.26%)。经计算,林龄2、3、5、7和9 a的林分中植被层碳储量所占比例(即乔木层、灌木层、草本层和凋落物层碳储量所占比例的总和)分别为22.62%、17.27%、19.63%、31.74%和39.67%;并且,这5个林龄林分中土壤碳储量和乔木层碳储量的总和分别占总碳储量的97.37%、97.35%、96.43%、96.64%和95.65%。除林龄2 a的林分外,其余林龄林分的土壤碳储量占总碳储量的比例随林龄增长而降低,植被层碳储量占总碳储量的比例随林龄增长而升高。

表6 不同林龄千年桐人工林总碳储量及其分配比例

Table 6 Total carbon storage and its distribution proportion of *Vernicia montana* Lour. plantation with different stand ages

| 林龄/a Stand age | 总碳储量/(t·hm ⁻²) Total carbon storage | 碳储量所占比例/% Proportion of carbon storage | | | | |
|-------------------|--|--|--------------------|-------------------|----------------------|------------|
| | | 乔木层 Arbor layer | 灌木层 Shrub layer | 草本层 Herb layer | 凋落物层 Litter layer | 土壤 Soil |
| 2 | 105.60 | 19.99 | 0.91 | 0.26 | 1.46 | 77.38 |
| 3 | 147.85 | 14.60 | 0.72 | 0.22 | 1.72 | 82.74 |
| 5 | 140.17 | 16.06 | 1.00 | 0.26 | 2.31 | 80.37 |
| 7 | 186.60 | 28.38 | 1.03 | 0.26 | 2.07 | 68.26 |
| 9 | 214.60 | 35.31 | 1.14 | 0.26 | 2.95 | 60.34 |

3 讨 论

本研究结果表明:不同林龄千年桐人工林乔木层中树干、树枝、树叶和树根的碳含量排序有所不同,这与不同林龄千年桐人工林的生长策略不同有关。总体来看,千年桐幼龄林(林龄2 a的林分)倾向于优先投资获取养分的部位(即树根和树叶),中龄林(林龄3、5和7 a的林分)侧重于各部位养分均衡,成熟林(林龄9 a的林分)则以个体生物量积累为主。在林龄3 a的千年桐人工林中,树干碳含量(536.34 g·kg⁻¹)明显高于树枝、树叶和树根的碳含量,平均胸径仅5.21 cm,说明此阶段千年桐人工林的生长策略以促进树高生长为主;而林龄9 a的千年桐人工林中,树干碳含量(636.95 g·kg⁻¹)也明显高于树枝、树叶和树根的碳含量,平均胸径达到11.42 cm,说明此阶段千年桐人工林的生长策略以促进胸径生长为主。供试千年桐人工林灌木层、草本层和凋落物层的碳含量总体上随林龄增长而升高,其中,灌木层和草本层碳含量升高是因为千年桐人工林的冠层位置较高、郁闭度不高、林下更新不强烈,灌木层和草本层仍能占

有一定的生态位,而凋落物层碳含量升高则与林内落叶不断积累有关。

研究结果表明:千年桐人工林乔木层中树干碳储量明显高于树枝、树叶和树根,总体上随林龄增长而升高,树干碳储量占乔木层碳储量的30%以上,说明树干对千年桐人工林乔木层碳积累有重要作用。总体来看,随着林龄增长,灌木层、草本层和凋落物层碳储量升高,但其所占比例却表现为先升高后降低。推测其原因为:供试千年桐幼龄和中龄林的郁闭度不高,灌木层依然占据有利生态位,促使其碳储量增加,但随着林分不断生长,灌木层的优势被逐渐削弱,碳储量积累下降;草本层在幼龄林中的生态空间大,但随着林龄增长,其生存空间逐渐被乔木、灌木和凋落物挤占,导致其碳储量所占比例先升高后降低;幼龄林处于速生阶段,林分密度较大,凋落物较少,中龄林林木竞争剧烈,自然整枝强烈,凋落物积累较快,而成熟林凋落物中主要为树叶,导致凋落物层碳储量所占比例下降。

除幼龄林外,其余林龄千年桐人工林植被层碳储量所占比例随林龄增长从17.27%升高至39.67%,而土壤碳储量所占比例则随林龄增长从82.74%降低至

60.34%,说明随着林龄增长,千年桐人工林植被从土壤中吸收碳的能力及植物体的碳存储能力不断增强,成熟林的碳储量是千年桐人工林的主要积累期,此阶段的碳吸存能力最强。

经计算,林龄2、3、5、7和9 a的千年桐人工林的土壤碳储量与植被层碳储量的比值分别为3.42、4.79、4.10、2.15和1.52。其中,林龄7和9 a的林分土壤碳储量与植被层碳储量的比值低于中国森林土壤碳储量与植被层碳储量比值的均值(3.4)^[30],这可能是因为这2个林分所处山地的土层较薄,碳素容易随着降雨而流失^[31],导致土壤碳储量(127.38和129.47 t·hm⁻²)明显低于中国森林土壤碳储量均值(193.55 t·hm⁻²)^[30];但是,随着千年桐人工林不断生长,土壤碳储量仍能逐渐升高。本研究中,林龄5 a的林分土壤碳储量低于林龄3 a的林分,这可能是因为林龄5 a的林分在第4年时进行了人工抚育,导致林地土壤裸露程度提高,从而提高了地温,增大了土壤碳呼吸强度,进而促进土壤CO₂排放^[32],在一定程度上降低了林分土壤的碳储量。而人工抚育对林龄7和9 a的林分土壤碳储量的影响则通过较长时间的林分演替得到缓解和修复,从而呈现土壤碳储量逐渐升高的趋势。

千年桐具有速生特性,乔木层生长较快,碳库积累迅速。林龄9 a的千年桐人工林植被层碳储量为85.13 t·hm⁻²,较中国森林植被层平均碳储量(57.07 t·hm⁻²)^[30]高49.17%,较同气候带的青冈〔*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.〕常绿阔叶林植被层碳储量(66.113 t·hm⁻²)^[33]高28.76%;各林龄林分的土壤碳储量基本上均高于同气候带的鼎湖山常绿阔叶林土壤碳储量(89.128 t·hm⁻²)^[34]。可见,千年桐不但可以作为非木质利用的树种,还可以作为生态林树种,是亚热带区域优良的清洁发展机制(CDM)再造林树种。

参考文献:

- [1] 金奖铁,李扬,李荣俊,等. 大气二氧化碳浓度升高影响植物生长发育的研究进展[J]. 植物生理学报, 2019, 55(5): 558-568.
- [2] 吴思思,邢伟,葛之葳. 人工林碳储量及影响因子研究进展[J]. 江苏林业科技, 2017, 44(6): 47-51.
- [3] YANG H, ZHANG X, HONG Y. Classification, production, and carbon stock of harvested wood products in China from 1961 to 2012 [J]. BioResources, 2014, 9(3): 4311-4322.
- [4] 宫超,汪思龙,曾掌权,等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1935-1941.
- [5] 胡海清,罗碧珍,罗斯生,等. 林火干扰对森林生态系统碳库的影响研究进展[J]. 林业科学, 2020, 56(4): 160-169.
- [6] 周序力,蔡琼,熊心雨,等. 贵州月亮山不同演替阶段亮叶水青冈林碳储量及其分配格局[J]. 植物生态学报, 2018, 42(7): 703-712.
- [7] 王振鹏,陈金磊,李尚益,等. 湘中丘陵区不同恢复阶段森林生态系统的碳储量特征[J]. 林业科学, 2020, 56(5): 19-28.
- [8] ANGEL H Z, PRIEST J S, STOVALL J P, et al. Individual tree and stand-level carbon and nutrient contents across one rotation of loblolly pine plantations on a reclaimed surface mine [J]. New Forests, 2019, 50: 733-753.
- [9] ESLAMDOUST J, SOHRABI H. Carbon storage in biomass, litter, and soil of different native and introduced fast-growing tree plantations in the South Caspian Sea [J]. Journal of Forest Research, 2018, 29(2): 449-457.
- [10] RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R, EIMIL-FRAGA C, GÓMEZ-GARCÍA E, et al. Exploring the factors affecting carbon and nutrient concentrations in tree biomass components in natural forests, forest plantations and short rotation forestry [J]. Forest Ecosystems, 2018, 5: 35.
- [11] 曹恭祥,郭中,王云霓,等. 呼伦贝尔沙地樟子松人工林乔木层固碳速率及其对气象因子的响应[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1082-1090.
- [12] 廖国莉,段劫,贾忠奎,等. 辽东地区不同林龄长白落叶松人工林生态系统碳储量分配特征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(11): 8-13, 22.
- [13] 程然然,关晋宏,张建国,等. 甘肃省5种典型人工林生态系统固碳现状与潜力[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1112-1120.
- [14] 李彦华,张文辉,申家朋,等. 甘肃黄土丘陵区侧柏人工幼林的碳密度及分配特征[J]. 林业科学, 2015, 51(6): 1-8.
- [15] 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[J]. 生态学杂志, 2016, 35(4): 896-902.
- [16] ZHOU L, LI S, LIU B, et al. Tissue-specific carbon concentration, carbon stock, and distribution in *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook plantations at various developmental stages in subtropical China [J]. Annals of Forest Science, 2019, 76: 70.
- [17] 罗艳,何朋俊,吕倩,等. 目标树经营初期对马尾松人工林碳贮量的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(2): 206-214.
- [18] ZHOU X, WEN Y, GOODALE U M, et al. Optimal rotation length for carbon sequestration in *Eucalyptus* plantations in subtropical China [J]. New Forests, 2017, 48: 609-627.
- [19] 洪滔. 千年桐人工林生态系统碳库研究[D]. 福州: 福建农林大学林学院, 2009.
- [20] 洪滔,吴承祯,林勇明,等. 千年桐人工林乔木层的生物量

- 特征[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 648-654.
- [21] 周幼成, 钟秋平, 李清平, 等. 千年桐半木质化春梢扦插繁殖及生根机理研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(8): 25-36.
- [22] 欧阳玉莹, 洪滔, 洪陈洁, 等. 不同内生真菌对缺磷条件下千年桐幼苗生长及C、N、P和K含量的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(4): 32-44.
- [23] 樊月, 陈志为, 潘云龙, 等. 林龄和坡位对杉桐混交林化学计量特征的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(2): 246-253.
- [24] 巢林, 林晗, 吴承祯, 等. 千年桐(*Aleurites montana*)人工林细根特征及其与细根N、C含量的关系[J]. 山地学报, 2015, 33(1): 33-41.
- [25] HONG T, LIN H, HE D. Characteristics and correlations of leaf stomata in different *Aleurites montana* provenances [J]. PLOS ONE, 2018, 13(12): e0208899.
- [26] FAN Y, OUYANG Y, PAN Y, et al. Effect of aluminum stress on the absorption and transportation of aluminum and macronutrients in roots and leaves of *Aleurites montana* [J]. Forest Ecology and Management, 2020, 458: 117813.
- [27] 李泽, 谭晓风, 卢锐, 等. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1515-1524.
- [28] LE H N T, IMAMURA K, FURUTA M, et al. Production of biodiesel from *Vernicia montana* Lour. oil using a co-solvent method and the subsequent evaluation of its stability during storage [J]. Green Processing and Synthesis, 2018, 7: 170-179.
- [29] 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 等. 湖南会同地区马尾松林生物量的测定[J]. 林业科学, 1982, 18(2): 127-134.
- [30] 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.
- [31] 王文欣, 庄义琳, 庄家尧, 等. 不同降雨强度下坡地覆盖对土壤有机碳流失的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 62-66.
- [32] 陈书涛, 黄耀, 邹建文, 等. 中国陆地生态系统土壤呼吸的年际间变异及其对气候变化的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(8): 1273-1281.
- [33] 李铭红, 于明坚, 陈启瑞, 等. 青冈常绿阔叶林的碳素动态[J]. 生态学报, 1996, 16(6): 645-651.
- [34] 莫江明, 方运霆, 彭少麟, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林碳素积累和分配特征[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 1970-1976.
- (责任编辑: 佟金凤)

《植物资源与环境学报》2020年审稿专家名单

《植物资源与环境学报》2020年审稿专家名单如下(按姓氏的汉语拼音排序):

曹建国 陈剑 陈儒钢 陈世品 陈学林 陈雨 崔大方 董胜君 董仕勇 段爱国 段成国 方炎明
 高天刚 葛之葳 郭海林 郭伟 郝成元 洪滔 胡春梅 胡光万 华建峰 黄新元 黄园 贾晓东
 江玉梅 金华 金孝锋 李键 李伟 李先琨 李亚 李葵 梁呈元 梁建萍 梁珩硕 廖文波
 刘金福 刘启新 刘世彪 龙春林 陆长梅 马和平 马永鹏 彭方仁 秦民坚 仇硕 阮成江 单宇
 尚旭岚 申卫收 生利霞 石莎 宋春风 宋希强 苏仕林 孙小芹 田敏 汪仁 王桂清 王金彦
 王奇志 王树力 王贤荣 闻志彬 翁庆北 吴承祯 徐晟 徐迎春 徐增莱 许岳飞 宣继萍 闫淑珍
 杨志玲 易绮斐 尹立河 余坤勇 俞筱押 俞元春 郁万文 袁干军 原海燕 张春红 张大勇 张国防
 张敕 张钦弟 张松贺 张重义 郑玉红 周蕴薇 周志春 邹双全

本刊对各位审稿专家的支持表示诚挚的感谢!