

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.05.013

桂西北秃杉人工林不同年龄阶段的固碳功能

谢敏洋¹, 何 斌^{1*}, 戴 军², 黄振格¹, 周 刚¹, 张日施¹

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态和保育重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 广西国有维都林场, 广西来宾 546000)

摘要: [目的] 探究秃杉人工林生长过程中的固碳功能及其变化趋势, 为合理评价其生态效益提供依据。[方法] 以桂西北秃杉人工林为研究对象, 采用野外调查与室内分析相结合的方法, 研究广西南丹县 4 个年龄阶段秃杉林 (9、17、25、37 年生) 生态系统碳含量、碳储量、年净固碳量及其分配特征。[结果] (1) 秃杉不同器官碳含量为 425.3~507.2 g·kg⁻¹; 灌木层碳含量为 446.9~461.3 g·kg⁻¹; 草本层碳含量为 387.0~412.5 g·kg⁻¹; 凋落物层碳含量为 410.5~438.2 g·kg⁻¹; 土壤层 (0~80 cm) 碳含量为 5.72~45.79 g·kg⁻¹, 且随土层加深而下降, 同时随林龄增加而增大。(2) 不同年龄阶段 (9、17、25、37 年生) 秃杉林生态系统碳储量分别为 180.39、223.24、254.65、314.59 t·hm⁻², 其中, 乔木层依次占 20.15%、33.72%、38.31%、46.70%, 灌草层依次占 0.37%、0.66%、0.88%、0.84%, 凋落物层依次占 0.51%、0.93%、1.17%、1.41%, 土壤层依次占 78.98%、64.69%、59.69%、51.06%。(3) 9、17、25、37 年生秃杉林年净固碳量分别为 5.42、7.15、7.32、7.03 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中, 乔木层依次占 85.24%、73.85%、70.41%、68.58%, 年凋落物依次占 14.76%、26.15%、31.42%、29.59%。[结论] 桂西北秃杉人工林生态系统碳储量随生长过程增加的变化规律明显, 碳汇潜力巨大, 研究结果为桂西北地区碳汇林业的经营与发展提供了依据。

关键词: 秃杉人工林; 林龄; 碳储量; 碳分配; 桂西北

中图分类号: S718.55⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)05-0106-08

森林是陆地生态系统的主体^[1], 人工林作为森林生态系统的重要组成部分, 在增加森林碳汇和碳吸存能力、改善生态环境等方面发挥着越来越重要的作用^[2-4]。中国是世界人工林面积最大的国家, 其森林植被碳汇功能主要来自于人工林的贡献。因此, 通过造林、再造林等活动增加森林生态系统碳固定量, 已成为推进中国碳汇林业发展和实施碳减排计划最主要的途径, 而营造具有收获木材和固碳双重功能的新型人工林则是其重要固碳手段之一^[5-6]。近十多年来, 国内外学者先后对杨树 (*Populus L.*)^[7]、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)^[8-9]、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)^[10]、桉树 (*Eucalyptus robusta* Smith)^[11]、兴安落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)^[12]、日本落叶松

(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr)^[13] 等人工林的碳汇功能开展了大量的研究, 为人工林生态系统碳汇功能及其生态效益的评估提供了基础数据。

杉木是我国南方山地主要的造林树种之一^[14], 在我国林业生产和木材战略储备基地建设中具有重要的地位; 但由于杉木连栽导致地力严重衰退和生态功能下降等问题日趋严重^[15-16]。因此, 寻找和解决杉木采伐迹地更新的经营措施和技术途径, 对森林可持续经营和林业生态安全具有重要意义和作用。秃杉 (*Taiwania flousiana* Gaussen) 为杉科台湾杉属珍稀树种, 具有适应性强、速生、生物生产力及出材率高和材质优良等优点^[17], 已成为南方中低山区杉木采伐迹地更新的优良替代树种

收稿日期: 2019-11-18 修回日期: 2020-06-23

基金项目: 广西重点研发计划项目 (桂科 AB1729008); 国家自然科学基金资助项目 (31560206)

* 通讯作者: 何斌, 研究员. 研究方向: 森林培育、森林土壤和森林生态. E-mail: hebin8812@163.com

和退耕还林地的重要栽培树种^[18]。由于秃杉生长的成熟期和衰退期均较晚,速生期持续时间长,而且没有出现杉木大径材因处于成熟或过熟期而容易发生的枯梢及木材心腐现象,因此,更适合培育大径材^[19]和国家木材战略储备林。据统计,广西秃杉人工林造林面积从2009年约2 000 hm²发展到2017年约1.3万hm²,并继续以较高的增长速度持续增加。目前,有关秃杉人工林碳储量的研究已有一些报道^[20-23],但均集中在以培育中小径材为经营目标且采用较高林分密度经营的中、幼龄林。为此,本文以广西西北部南丹县不同年龄阶段(9、17、25、37年生)秃杉林为研究对象,采用标准地调查和室内分析方法,对不同年龄阶段秃杉人工林生态系统碳含量、碳储量、年净固碳量及其分布进行对比分析,以揭示秃杉林生长过程中生态系统的固碳功能及其变化趋势,为合理评估秃杉林尤其是大径级用材林的生态效益及发挥其碳汇功能提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于广西西北部的南丹县山口林场。南丹县(107°1′~107°55′E、24°42′~25°37′N)地处云贵高原边缘,地貌以中低山为主,海拔高度多数在500~1 000 m,具有高原山区的气候特点和变化规律。年平均温度16.9℃,年平均降水量1 498 mm,试验地海拔950~1 020 m,土壤母质(母岩)为砂

页岩,风化程度较深,土壤类型为山地黄壤,平均土层厚度80 cm以上,腐殖质层厚度18~25 cm。

各年龄阶段秃杉林前茬林分均为杉木纯林,分别于各自造林前一年冬天采伐,经炼山和清理杂物后挖穴整地,种植穴规格为0.4 m×0.4 m×0.3 m。第2年3—4月用林场苗圃培育的1年生实生苗(贵州雷公山种源)定植,造林密度为2 500株·hm⁻²(株行距2 m×2 m)。秃杉造林后前3年的春季和秋季各进行1次铲草抚育,造林后第9~10、14~15、19~20年分别进行间伐,间伐强度分别约为25%、20%、30%,生长期间没有进行人工施肥。

2 研究方法

2.1 样地设置与植被生物量测定

2.1.1 样地设置 根据南丹山口林场不同林龄秃杉林林分分布状况,于2018年3—4月在地理位置毗邻、立地条件相似的地段,分别选取9、17、25、37年生秃杉林为研究对象,在不同林龄的秃杉林内分别设置3个样地,样地大小为600 m²(20 m×30 m)。

2.1.2 林分生长调查 调查指标包括样地林冠郁闭度、林分密度,林木胸径、树高、冠幅和枝下高。计算平均胸径和平均树高。各林龄样地基本情况见表1。

表1 秃杉人工林样地概况

Table 1 The plots information of *T. flousiana* plantations

林龄 Stand age / a	林分密度 Stand density/(tree·hm ⁻²)	坡向 Aspect	坡位 Slope positions	坡度 Slope / (°)	平均胸径 Average DBH / cm	平均树高 Average height / m	郁闭度 Canopy density	林下植被盖度 Undergrowth cover degree/%
9	2 100	东北 NE	中 Middle	28	11.86	9.38	0.87	32.5
17	1 250	东北 NE	中 Middle	31	19.83	16.21	0.83	45.7
25	850	东北 NE	中 Middle	30	26.31	18.17	0.72	52.0
37	680	北 N	中 Middle	32	34.76	22.40	0.65	60.8

2.1.3 乔木层生物量测定 为了不破坏秃杉林样地的林分,在每个年龄阶段样地外选择3株平均木并伐倒,采用“Monsic 分层切割法”分别测定地上部分树叶、树枝、干皮和干材鲜质量,地下部分采用“全根挖掘法”将各种根系挖出并测定其鲜质量^[20];同时按“混合取样法”采集各器官样品500~600 g

带回实验室后于80℃烘箱中烘干,测定含水率和干质量。

2.1.4 灌木层、草本层和凋落物层生物量测定 在每个样地内按对角线设置2 m×2 m小样方3个,调查其植物种类、个体数、高度和覆盖度等。采用“样方收获法”按灌木层、草本层和凋落物层测定鲜质量,采集样品约500 g带回实验室后于80℃烘

箱中烘干,测定含水率和干质量。

2.1.5 年凋落物归还量测定 在每个样地内随机设置 5 个 1 m×1 m 正方形木框架尼龙网收集器,尼龙网的孔径为 1 mm,每月月底收集凋落物 1 次,按凋落叶、凋落枝和杂物等组分分别烘干后测定干质量。

2.1.6 土壤样品采集 在每块样地内,按 S 形在每个样地内设置 5 个土壤剖面,将土壤剖面分 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 4 个层次。在每个层次分别取土壤约 500 g,并将同一样地内不同土壤剖面同一层次的土壤样品混合装袋,带回实验室并自然风干;同时用环刀采集原状土测定土壤容重^[18]。

2.2 植物和土壤碳储量计算方法

2.2.1 植物层生物量计算方法 利用调查时获得乔木层各器官、灌木层、草本层、凋落物层的干/鲜质量比计算其相应组分含水率,然后根据鲜质量和含水率估算各结构层次生物量或现存量^[21]。

2.2.2 碳含量测定方法 在测定各结构层次植物生物量的同时,选取各组分样品粉碎过 0.5 mm 筛,与经自然风干并研磨过 0.149 mm 筛的土壤样品分别装瓶待测。植物和土壤样品碳含量均采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[24]。

2.2.3 碳储量计算方法 根据乔木层各器官、灌木层、草本层和凋落物层生物量及其测定相应碳含量,计算生态系统各结构层次的碳储量。计算公式如下:

植物各组分碳储量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)=植物各组分生物量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)×植物各组分碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)/1 000

各土层碳储量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)=土层厚度 (m)×土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)×10 000(m^2)×有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)/1 000

式中:10 000 为每公顷面积的 m^2 数量。

生态系统碳储量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)=乔木层碳储量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)+灌木层碳储量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)+草本层碳储量

($t \cdot \text{hm}^{-2}$)+凋落物层碳储量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)+土壤层碳储量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)

乔木层各器官年净固碳量 ($t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)=乔木层各器官年平均生物量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)×各器官碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)/1000

式中:除树叶按其生长时间 4 年计算外,其他器官均按林龄计算。

2.3 数据处理与分析

运用 Excel 2013 进行数据的整理和计算,采用 SPSS 22.0 软件对各年龄阶段秃杉人工林不同结构层次碳储量等数据间的差异性进行单因素方差分析 (ANOVA),同时进行 Duncan 多重比较。

3 结果与分析

3.1 不同年龄阶段秃杉林不同结构层次碳含量

从表 2 可看出:不同林龄秃杉平均碳含量为 471.6~483.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,按碳含量由高到低为 25、37、17、9 年生;各林龄林木不同器官碳含量均以干皮最高,其次是树枝、干材或树根,树叶最低。林分其他结构层次中(表 3),灌木层、草本层、凋落物层碳含量分别为 446.9~461.3、387.0~412.5、410.5~438.2 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相同林龄群落各结构层次植物碳含量均以乔木层最高,其次是灌木层,草本层较低,表现为随植物个体高度或组织木质化程度降低而递减的变化趋势。

不同年龄阶段秃杉林土壤碳含量在剖面分布上均呈随土壤深度增加而明显下降的趋势(表 3),其中,0~20 cm 土层碳含量明显高于其它土层,但相邻土层间碳含量的差异随土壤深度增加而逐渐减小;在同一土层中,均以 9 年生最低,表现为随林龄增加而增大,其中,0~20、20~40、40~60 cm 土层中,37 年生与 9 年生碳含量间差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 不同林龄秃杉各器官碳含量

Table 2 Carbon content in various organs of *T. flousiana* at different ages

林龄 Stand age/a	树叶 Leaf	树枝 Branch	干皮 Bark	干材 Stem	树根 Root	平均 Average
9	425.3±12.5 b	489.6±18.2 a	492.5±10.4 a	478.0±7.5 ab	472.8±18.7 ab	471.6±27.1
17	430.8±15.3 b	486.4±20.4 a	497.6±13.6 a	480.5±10.9 ab	482.7±16.0 ab	475.6±25.9
25	452.7±8.5 b	492.0±15.7 ab	507.2±18.2 a	486.6±12.4 ab	476.4±17.1 ab	483.0±20.3
37	436.2±11.8 b	487.3±16.2 a	495.8±15.0 a	482.7±9.4 ab	480.5±14.7 ab	476.5±23.3

注:表中数据为平均值±标准差。同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同(表4、5)。

Note: Data in the table as mean±standard deviation, the same below. Different lowercase letters in the same lines showed significant difference ($P<0.05$). The same below (Table 4, 5).

表 3 不同林龄秃杉林灌木层、草本层、凋落物层和土壤层碳含量

Table 3 Carbon contents in Shrub, herb litter and soil layers of *T. flousiana* plantation at different ages

g·kg⁻¹

林龄 Stand age/a	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	凋落物层 Litter layer	土层 Soil layer/cm			
				0~20	20~40	40~60	60~80
9	453.6±15.0 a	395.8±9.4 a	410.5±15.9 a	37.16±2.85 b	19.30±1.84 b	7.45±0.52 b	5.72±0.40 a
17	446.9±10.7 a	412.5±12.5 a	438.2±8.7 a	38.27±2.18 b	19.85±2.01 b	7.86±0.38 ab	6.08±0.29 a
25	450.9±8.6 a	387.0±13.0 a	420.8±13.6 a	41.37±3.41 ab	21.24±1.73 ab	8.42±0.58 ab	6.14±0.34 a
37	461.3±12.8 a	408.9±7.5 a	415.6±11.8 a	45.79±3.34 a	23.74±2.67 a	8.65±0.43 a	6.42±0.38 a

注: 不同小写字母表示相同组分或土层不同林龄间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters indicate the significant difference between different stand ages in the same component (soil layer) (P<0.05).

3.2 不同年龄阶段秃杉林生态系统碳储量及其分配

由表 4 可看出: 9、17、25、37 年生秃杉林生态系统碳储量分别为 180.39、223.24、254.65、314.59 t·hm⁻², 随林龄增加而显著增大 (P<0.05)。乔木层作为秃杉林生态系统的主要组成部分, 9、17、25、37 年生碳储量依次为 36.34、75.28、97.56、146.92 t·hm⁻², 分别占生态系统碳储量的 20.15%、33.72%、38.31%、46.70%; 其中, 干材碳储量依次占乔木层碳储量的 47.14%、57.51%、62.93%、69.89%; 树枝碳储量依次占 22.01%、18.53%、15.59%、9.96%; 树根、树叶和干皮碳储量依次占

11.82%~14.64%、2.93%~11.64%、4.17%~4.57%。

9、17、25、37 年生秃杉林灌草层碳储量分别为 0.66、1.47、2.23、2.60 t·hm⁻², 随林龄增加而增大, 表现出与林分郁闭度 (表 1) 相反的变化趋势, 说明林分郁闭度既影响到灌草层的生长, 同时也影响到灌草层碳储量的生物积累; 凋落物层碳储量分别为 0.92、2.07、2.96、4.43 t·hm⁻², 随林龄增加而增大, 说明秃杉林的生长过程有利于凋落物碳储量的生物积累; 土壤层 (0~80 cm) 碳储量分别为 142.47、144.42、151.90、160.64 t·hm⁻², 分别占生态系统碳储量的 78.98%、64.69%、59.69%、51.06%; 各年龄阶段土壤碳储量均随土层加深而逐渐递减,

表 4 不同林龄秃杉林生态系统碳储量及其分配

Table 4 Carbon storage and spatial distribution of *T. flousiana* plantation ecosystem at different ages

t·hm⁻²

层次 Layer	组分 Component	林龄 Stand age/a			
		9	17	25	37
乔木层 Arbor	树叶 Leaf	4.23±0.29 b	4.45±0.29 b	5.31±0.26 a	4.31±0.49 b
	树枝 Branch	8.00±0.51 b	13.95±0.24 a	15.21±0.89 a	14.62±1.11 a
	干皮 Bark	1.66±0.18 c	3.35±0.22 b	4.15±0.20 b	6.13±0.06 a
	干材 Stem	17.13±0.99 d	43.29±1.66 c	61.39±1.62 b	102.68±8.76 a
	树根 Root	5.32±0.55 a	10.24±0.37 b	11.51±0.87 b	19.18±1.69 c
	小计 Sub-total	36.34±1.96 d	75.28±1.50 c	97.56±3.43 b	146.92±10.29 a
灌木层 Shrub layer		0.41±0.10 d	1.05±0.14 c	1.70±0.16 b	1.97±0.17 a
草本层 Herb layer		0.25±0.06 d	0.42±0.05 c	0.53±0.11 b	0.63±0.09 a
凋落物层 Litter layer		0.92±0.07 d	2.07±0.15 c	2.96±0.12 b	4.43±0.23 a
土壤层 Soil layer/cm	0~20	69.48±2.81 b	69.77±4.01 ab	73.11±3.07 ab	78.03±2.44 a
	20~40	39.04±1.84 b	39.48±1.23 ab	42.07±3.41 ab	45.44±1.42 a
	40~60	18.83±0.61 a	19.24±0.53 a	20.47±0.66 a	20.85±1.26 a
	60~80	15.12±0.46 a	15.93±0.56 a	16.25±0.54 a	16.33±0.56 a
	小计 Sum	142.47±2.34 b	144.42±4.10 ab	151.90±6.10 ab	160.64±2.17 a
合计 Total		180.39±2.40 d	223.24±5.38 c	254.65±7.92 b	314.59±11.02 a

其中, 0~20 cm土层碳储量远高于其他土层, 占土壤层碳储量的 48.13%~48.77%。

3.3 不同年龄阶段秃杉林年净固碳量的估算

年净固碳量反映了森林碳汇功能的强弱, 是衡量森林生态系统吸收和固定 CO₂ 量的重要指标。从表 5 可见: 9、17、25、37 年生秃杉林年净固碳量分别为 5.42、7.15、7.32、7.03 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中, 17、25、37 年生前差异不显著 (P>0.05),

且均显著高于 9 年生 (P<0.05)。不同年龄阶段乔木层年净固碳量依次为 4.62、5.28、5.02、4.95 t·hm⁻²·a⁻¹, 分别占林分年净固碳量的 85.24%、73.85%、68.58%、70.41%。各器官中, 干材年净固碳量最大, 其次是树叶、树枝和树根, 干皮的最小。年凋落物净固碳量分别为 0.80、1.87、2.30、2.08 t·hm⁻²·a⁻¹, 分别占 14.76%、26.15%、31.42%、29.59%。

表 5 不同林龄秃杉林年净固定碳量

Table 5 Annual carbon sequestration of *T. flousiana* plantation at different ages

组分 Component	不同林龄年净固碳量 Annual carbon sequestration of different ages / (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)				
	9	17	25	37	
乔木 Arbor	树叶 Leaf	1.06±0.07 b	1.11±0.07 b	1.33±0.06 a	1.08±0.12 b
	树枝 Branch	0.89±0.06 a	0.82±0.01 a	0.60±0.04 b	0.40±0.03 c
	干材 Stem	1.90±0.11 b	2.55±0.10 a	2.46±0.06 a	2.78±0.24 a
	干皮 Bark	0.18±0.02 b	0.20±0.01 a	0.17±0.01 b	0.17±0.00 b
	树根 Root	0.59±0.06 a	0.60±0.02 a	0.46±0.03 b	0.52±0.05 ab
年凋落物 Annual litter	0.80±0.05 c	1.87±0.12 b	2.30±0.12 a	2.08±0.09 ab	
合计 Total	5.42±0.33 b	7.15±0.27 a	7.32±0.18 a	7.03±0.35 a	

4 讨论

森林碳储量的大小取决于其生物量和含碳系数。目前, 国内外研究者在进行森林碳储量计算时采用 500 g·kg⁻¹ 或 450 g·kg⁻¹ 作为转换系数进行估算^[25-27]。本研究中, 不同林龄秃杉平均碳含量为 471.6~483.0 g·kg⁻¹, 与相同或相近区域桂西北西南桦 (*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don) 平均碳含量 (466.7 g·kg⁻¹)^[28]、广西南宁市不同林龄马占相思 (*Acacia mangium* Willd.) 平均碳含量 (478.8~482.0 g·kg⁻¹)^[29]、Elias 等^[30] 对 32 个热带森林树种碳含量 (444.0~494.5 g·kg⁻¹) 研究结果基本一致, 低于福建省南平市不同发育阶段杉木平均碳含量 (493.0~519.9 g·kg⁻¹)^[31] 和福建省顺昌县马尾松不同发育阶段平均碳含量 (496.9~525.9 g·kg⁻¹)^[32], 说明林木中碳含量的多少与树种密切相关, 同时也受林龄或生长阶段等影响。本研究中, 各林龄秃杉平均碳含量均在 450~500 g·kg⁻¹ 间, 但不同林龄之间存在差异, 因此, 如果采用上述系数分别计算不同年龄阶段秃杉林碳储量时, 可能因为高估或低估秃杉林生态系统的碳储量, 从而导致结果偏差。

桂西北 9、17、25、37 年生秃杉林生态系统碳储量分别为 180.39、223.24、254.65、314.59 t·hm⁻², 其中, 乔木层碳储量分别占 20.15%、33.72%、38.31%、46.70%。不同林龄乔木层碳储量均明显高于相同或相近林龄的广西北部杉木林^[33] 和福建省顺昌县马尾松林^[32], 其中, 17、25、37 年生乔木层碳储量也高于中国森林乔木层碳储量平均水平 (57.07 t·hm⁻²)^[34] 及中国热带、亚热带针叶林碳储量 (63.17 t·hm⁻²), 表明该地区秃杉林具有明显的速生特性和较大的碳储存潜力, 而其植被层碳储量随林龄增加而显著增大 (P<0.05), 说明林龄是影响秃杉林生态系统碳储量积累的主要主导因子。由于秃杉成熟期晚, 其速生时间可达 50~100 年^[35]。因此, 即使秃杉林林龄达到 37 年生, 其碳储量仍然保持明显的增长趋势。

据报道, 广西南宁马占相思林^[29] 和福建省顺昌县马尾松林土壤碳储量均随林龄增加而增大, 大兴安岭兴安落叶松林土壤碳储量随林龄增加呈先减少后增加的变化趋势^[36], 广西北部^[33] 和江西省吉安市^[37] 杉木林土壤碳储量则随林龄增加表现出先增加后下降的变化规律。本研究中, 4 个林龄秃杉林

土壤碳储量(142.47~160.64 t·hm⁻²),均高于我国天然林平均土壤碳储量(109.1 t·hm⁻²)和人工林平均土壤碳储量(107.1 t·hm⁻²)^[38],并表现出随林龄增加而增大的变化趋势,说明研究区森林土壤碳储存功能较强;而在秃杉林生长过程中,由于其凋落物比较丰富且以较容易分解的树叶和柔软小枝为主,加上间伐和林分自疏过程中留在林地的大量树叶、树枝和根系,通过分解和腐殖化作用从而增加土壤碳储量;另一方面,秃杉根系发达,根系之间相互连生,通过大量活根的分泌和死根系的腐解也增加了土壤碳储量。因此,秃杉林的生长过程可以促进土壤碳的生物积累,发挥其木材生产和土壤固碳的协同作用^[39]。

研究表明,江西省吉安市7、16、25、34年生杉木林乔木层年净固碳量分别为2.14、4.65、3.77、2.78 t·hm⁻²·a⁻¹^[37],广西武宣县8、14、23、38年生马尾松林乔木层年净固碳量分别为1.99、3.85、4.09、2.60 t·hm⁻²·a⁻¹^[40],四川南部15、27、39年生马尾松林乔木层年净固碳量分别为4.25、5.03、3.17 t·hm⁻²·a⁻¹^[10]。本研究中,9、17、25、37年生秃杉林年净固碳量分别为5.42、7.15、7.32、7.03 t·hm⁻²·a⁻¹,其中,乔木层年净固碳量分别为4.62、5.28、5.02、4.95 t·hm⁻²·a⁻¹,不同林龄之间差异不显著,且多数高于上述相同或相近林龄的杉木林和马尾松林。可见,研究区秃杉林速生特性明显,固碳能力强。秃杉林生长过程中,虽然经过多次高强度间伐,但其碳积累速率并未因林分密度急剧下降而明显减少,直至37年生时仍保持较高的碳积累速率,同时也显示出秃杉林具有较大的碳吸存潜力。

当前,在人工林传统经营即实现木材产量和经济效益最大化的基础上,提高其固碳潜力和碳汇效益,已成为人工林多目标经营中的一种新型经营模式。作为这一经营模式的适宜树种,从碳吸存量考虑,则必须兼具生长速率快和碳积累量大2个方面。因此,从秃杉的生物生态学特性、碳积累速率与潜力(包括碳储量、年净固碳量及其变化趋势)等综合分析表明,秃杉是桂西北地区培育大径级(林分平均胸径≥26 cm)优级材和培育碳汇人工林的优良树种。

5 结论

(1) 桂西北不同年龄阶段秃杉林生态系统碳

储量为180.39~314.59 t·hm⁻²,其中,乔木层碳储量为36.34~146.92 t·hm⁻²,占生态系统碳储量的20.15%~46.70%;灌草层、现存凋落物层分别为0.66~2.60、0.92~4.43 t·hm⁻²,分别占生态系统碳储量的0.36%~0.88%、0.51%~1.43%;土壤层碳储量为142.47~160.64 t·hm⁻²,占生态系统碳储量的51.06%~78.98%。

(2) 桂西北不同年龄阶段秃杉林年净固碳量分别为5.42~7.32 t·hm⁻²·a⁻¹,随林龄增加呈先增大(9~25年生)后缓慢下降(25~37年生)的趋势。与杉木和马尾松人工林相比,秃杉林兼具生长速率快、碳积累量及其潜力大的优点,具有较高的固碳功能。因此,在桂西北地区大力发展秃杉大径级珍贵用材林,将成为兼具木材收获和碳吸存效益的多目标人工林可持续经营模式。

参考文献:

- [1] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2004, 104(3): 399-417.
- [2] 徐新良,曹明奎,李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(6): 1-10.
- [3] 施志娟,白彦锋,孙睿,等. 杉木人工林伐后2种恢复模式碳储量的比较[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 214-221.
- [4] Zhao M, Yang J, Zhao N, *et al.* Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 448: 528-534.
- [5] 魏晓华,郑吉,刘国华,等. 人工林碳汇潜力新概念及应用[J]. *生态学报*, 2015, 35(12): 3881-3885.
- [6] Chen D, Zhang C, Wu J, *et al.* Subtropical plantations are large carbon sinks: Evidence from two monoculture plantations in South China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(9): 1214-1225.
- [7] 贾黎明,刘诗琦,祝令辉,等. 我国杨树林的碳储量和碳密度[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2013, 37(2): 1-7.
- [8] 李娟,白彦锋,彭阳,等. 湖南会同县杉木人工林管理碳汇的核算研究[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(3): 436-443.
- [9] Zhang H, Zhou G, Wang Y, *et al.* Thinning and species mixing in Chinese fir monocultures improve carbon sequestration in subtropical China[J]. *European Journal of Forest Research*, 2019, 138(3): 433-443.
- [10] Justine M F, Yang W, Wu F, *et al.* Dynamics of biomass and carbon sequestration across a chronosequence of masson pine plantations[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(3): 578-591.

- [11] 王楚彪, 刘丽婷, 莫晓勇. 30个桉树无性系人工林碳储量分析[J]. 林业科学研究, 2013, 26(5): 661-667.
- [12] Qi G, Chen H, Zhou L, *et al.* Carbon stock of larch plantations and its comparison with an old-growth forest in Northeast China[J]. Chinese geographical science, 2016, 26(1): 10-21.
- [13] Peng W, Pukkala T, Jin X, *et al.* Optimal management of larch (*Larix olgensis* A. Henry) plantations in Northeast China when timber production and carbon stock are considered[J]. Annals of forest science, 2018, 75(2): 1-15.
- [14] 邱勇斌, 凌高潮, 郑文华, 等. 间伐对杉木人工林不同组分碳、氮、磷含量及其生态化学计量关系的影响[J]. 林业科学研究, 2019, 32(4): 64-69.
- [15] Liu B, Liu Q, Daryanto S, *et al.* Responses of Chinese fir and *Schima superba* seedlings to light gradients: Implications for the restoration of mixed broadleaf-conifer forests from Chinese fir monocultures[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 419: 51-57.
- [16] 夏丽丹, 于姣姐, 邓玲玲, 等. 杉木人工林地力衰退研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, 31(2): 37-42.
- [17] 陈建新, 王明怀, 殷祚云, 等. 广东省秃杉引种栽培效果及栽培区划分研究[J]. 林业科学研究, 2002, 17(4): 399-405.
- [18] 何 斌, 卢万鹏, 唐光卫, 等. 桂西北秃杉人工林土壤肥力变化的研究[J]. 林业科学研究, 2015, 28(1): 88-92.
- [19] 陈 强, 苏俊武, 刘云彩, 等. 秃杉大径材培育技术[J]. 林业科技通讯, 2017(2): 15-18.
- [20] 何 斌, 秃杉人工林速生阶段的碳库与碳吸存[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 427-432.
- [21] 何 斌, 黄寿先, 招礼军, 等. 秃杉人工林生态系统碳素积累的动态特征[J]. 林业科学, 2009, 45(9): 151-157.
- [22] 文 娟, 金大刚, 莫祝平, 等. 不同造林模式人工林碳贮量的预估及比较分析——以广西北部地区退化土地再造林项目为例[J]. 广西林业科学, 2009, 38(1): 35-38.
- [23] 陈金章. 秃杉人工林植被碳库和氮库的分配格局[J]. 亚热带植物科学, 2015, 44(3): 231-234.
- [24] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 272-273.
- [25] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, *et al.* Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon[J]. Nature, 2000, 403: 301-304.
- [26] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292: 2320-2322.
- [27] 曾伟生, 陈新云, 蒲 莹, 等. 基于国家森林资源清查数据的不同生物量和碳储量估计方法的对比分析[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 66-71.
- [28] 黄弼昌, 何 斌, 周燕萍, 等. 速生阶段西南桦人工林碳贮量及其分布格局[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(2): 79-83.
- [29] 何 斌, 刘运华, 余浩光, 等. 南宁马占相思人工林生态系统碳素密度与贮量[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 6-11.
- [30] Elias M, Potvin C. Assessing inter-and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(6): 1039-1045.
- [31] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带不同发育阶段杉木人工林生态系统碳贮量研究[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(2): 239-243, 267.
- [32] 尉海东, 马祥庆. 不同发育阶段马尾松人工林生态系统碳贮量研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 371-374.
- [33] 兰斯安, 杜 虎, 曾馥平, 等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1125-1134.
- [34] 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.
- [35] 孙志刚, 陈 强, 苏俊武, 等. 秃杉持续生长力的探讨[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(5): 116-119.
- [36] 齐 光, 王庆礼, 王新闻, 等. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林土壤有机碳贮量[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 10-16.
- [37] 王红英, 樊星火, 华玉武, 等. 不同林龄序列杉木人工林生态系统碳储量变化特征[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(21): 278-280.
- [38] 刘世荣, 王 晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [39] Yu W, Deng Q, Kang H. Long-term continuity of mixed-species broadleaves could reach a synergy between timber production and soil carbon sequestration in subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 440: 31-39.
- [40] 方 晰, 田大伦, 胥灿辉. 马尾松人工林生产与碳素动态[J]. 中南林业学院学报, 2003, 23(2): 11-15.

Carbon Sequestration of Different Aged *Taiwania flousiana* Plantations in Northwestern Guangxi

XIE Min-yang¹, HE Bin¹, DAI Jun², HUANG Zhen-ge¹, ZHOU Gang¹, ZHANG Ri-shi¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Guangxi State-owned Weidu Forest Farm, Laibin 546000, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] To study the carbon sequestration and its change during the growth of the *Taiwania flousiana* plantations, and to provide reference for rational assessment of its ecological benefits. [Method] Taking *T. flousiana* plantations at Nandan Forest Farm, Northwestern of Guangxi, as the research samples, the carbon content, carbon storage, annual carbon sequestration and distribution characteristics of *T. flousiana* plantation at four stand ages (9-, 17-, 25- and 37-years-old) were studied by field investigation and laboratory analysis. [Result] (1) The carbon content in different organs of *T. flousiana* ranged from 425.3 g·kg⁻¹ to 507.2 g·kg⁻¹. The content of shrub, herb, litter layers ranged from 446.9 g·kg⁻¹ to 461.3 g·kg⁻¹, from 387.0 g·kg⁻¹ to 412.5 g·kg⁻¹, and from 410.5 g·kg⁻¹ to 438.2 g·kg⁻¹, respectively. The carbon content of soil layer (0–80 cm) ranged from 5.72 g·kg⁻¹ to 45.79 g·kg⁻¹, which increased with stand age but decreased with the soil depth. (2) The total carbon storage in the 9-, 17-, 25- and 37-year-old *T. flousiana* plantations were 180.39, 223.24, 254.65 and 314.59 t·hm⁻², respectively, of which the arbor layer accounted for 20.15%, 33.72%, 38.31% and 46.70%, the shrub layer for 0.37%, 0.66%, 0.88% and 0.84%, the litter layer for 0.51%, 0.93%, 1.17% and 1.41%, and the soil layer for 78.98%, 64.69%, 59.69% and 51.06%, respectively. (3) Annual carbon sequestrations of *T. flousiana* plantations with the four age classes were up to 5.42, 7.15, 7.32 and 7.03 t·hm⁻²·a⁻¹, respectively, of which the arbor layer accounted for 85.24%, 73.85%, 70.41% and 68.58%, and the annual litter accounted for 14.76%, 26.15%, 31.42% and 29.59%, respectively. [Conclusion] The carbon storage of *T. flousiana* plantation in Northwest Guangxi obviously varies with growth, and has huge carbon storage potential. This study can be used as reference for the forest management aiming at carbon sequestration in northwestern Guangxi.

Keywords: *Taiwania flousiana* plantation; stand age class; carbon storage; carbon distribution; Northwestern Guangxi

(责任编辑: 徐玉秀)