

广西南丹县秃杉人工林碳储量及其分布格局

刘凡胜¹, 韦明宝¹, 莫少壮¹, 杨正文¹, 何斌^{2*}, 南雅薇², 惠柳笛²

(1. 南丹县山口林场, 广西南丹 547200; 2. 广西大学林学院, 广西南宁 530004)

摘要 采用标准样地法对广西南丹县 20 年生秃杉人工林碳储量及其空间分布格局进行研究。结果表明, 秃杉各器官碳含量为 436.4~501.2 g/kg, 其由大到小依次为干皮、树枝、树根、干材、树叶。灌木层、草本层和凋落物层碳含量分别为 449.8、392.5 和 424.7 g/kg。土壤(0~80 cm)平均碳含量为 19.0 g/kg, 各土层碳含量随土层深度增加而减少。20 年生秃杉人工林生态系统碳储量为 255.81 t/hm², 其中乔木层为 99.43 t/hm², 占整个生态系统碳储量的 38.87%; 灌木层为 2.14 t/hm², 占 0.84%; 凋落物层为 2.52 t/hm², 占 0.98%; 林地土壤(0~80 cm)为 151.72 t/hm², 占 59.31%。秃杉人工林各器官碳储量与其生物量成正比关系, 干材的生物量最大, 其碳储量也最高, 占植被层碳储量的 59.48%, 树枝、树叶、干皮和树根的碳储量共占 36.05%。20 年生秃杉人工林乔木层年净生产力为 12.52 t/(hm²·a), 有机碳年净固定量为 5.98 t/(hm²·a), 年净 CO₂ 吸收量为 21.93 t/(hm²·a)。

关键词 秃杉人工林; 碳储量; 碳分配

中图分类号 S718.55 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)06-0098-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.06.022



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Carbon Storage and Distribution of *Taiwania flousiana* Plantation Ecosystem in Nandan County, Guangxi

LIU Fan-sheng, WEI Ming-bao, MO Shao-zhuang et al (Shankou Forest Farm of Nandan County, Nandan, Guangxi 547200)

Abstract The spatial distribution of carbon storage in 20-year-old *Taiwania flousiana* plantation in Nandan County of Guangxi were studied by standard plot method. The results showed that carbon content in different organs of *T. flousiana* range from 436.4 g/kg to 501.2 g/kg, and the order from large to small was bark > branch > root > stem > leaf. The carbon contents of shrub layer, herb layer and litter layer were 449.8, 392.5 and 424.7 g/kg, respectively. The average carbon content of soil (0 - 80 cm) was 19.0 g/kg, and the carbon content of each soil layer decreases with the increase of soil depth. The total carbon storage in *T. flousiana* plantation ecosystems amounted to 255.92 t/hm², of which tree layer stored 99.43 t/hm², and accounted for 38.87%, shrub and herb layer stored 2.14 t/hm², and accounted for 0.84%, litter layer stored 2.52 t/hm², and accounted for 0.98%, soil layer stored 151.72 t/hm², and accounted for 59.31%. The carbon storage of each organ of *T. flousiana* plantation was in positive proportion to its biomass. The biomass of dry wood was the largest, and its carbon storage was also the highest, accounting for 59.48% of the carbon storage of tree layer. The carbon storage of branches, leaves, dry bark and roots accounted for 36.05%. The annual net productivity of 20-year-old *T. flousiana* plantation was 12.52 t/(hm²·a), and annual carbon fixation was 5.98 t/(hm²·a), and the annual net CO₂ absorption was 21.93 t/(hm²·a)。

Key words *Taiwania flousiana* plantation; Carbon storage; Carbon distribution

随着大气 CO₂ 浓度增加及人类活动的加剧, 世界气候经历着全球变暖的变化^[1], 森林生态系统和人类社会的经济发展都受到了显著的影响^[2]。营造既能供应木材又能发挥储碳、固碳能力, 兼具经济效益和碳汇生态效益的新型人工林^[3], 在增加森林碳汇和碳吸收能力、改善生态环境等方面发挥着越来越重要的作用^[4-5]。

秃杉(*Taiwania flousiana*)为杉科台湾杉属珍稀树种, 其适应性较强、生长快、病虫害极少, 单位面积生物量和蓄积量大、出材量高、材质优良。因其成熟期(一般 60 年以上才开花结实)和衰退期晚, 速生持续时间长, 生物量积累能力较强, 尤其适合培育大径材^[6]。因此, 秃杉已成为近年来我国南方中低山区大力推广种植的珍贵乡土树种之一。近年来, 秃杉引种栽培面积快速增大, 相关研究较多^[7-10], 主要涉及引种栽培、生物生产力和营养元素积累等方面, 但有关碳汇功能的报道很少, 且主要集中在经营目标为培育中小径材且采用较高密度(保留密度约 2 000 株/hm²)经营的林分^[11-13]。

广西南丹县是我国秃杉引种较早、面积较大的地区之一, 目前全县秃杉人工林面积近 4 000 hm²。该研究以培育中大径材为经营目标的广西南丹县 20 年生秃杉人工林为研究对象, 调查分析其生态系统碳储量及其分配格局, 为进一步评估秃杉人工林的固碳潜力和生态效益提供基础数据。

1 研究区概况

研究区位于广西西北部南丹县城关镇(107°31'E, 24°59'N)。南丹县属中亚热带山地气候类型, 海拔多数在 500~1 000 m, 年均气温 16.9 °C, 年均降雨量 1 498.2 mm。试验地设在山口林场水源林分场, 海拔 730~810 m, 土壤母岩为砂页岩, 土壤类型属于山地黄红壤, 平均厚度在 80 cm 以上。研究林分为在杉木(*Cunninghamia lanceolata*)采伐迹地营造的 20 年生秃杉人工林, 造林时间为 1999 年 3—4 月。2019 年 5 月调查时的林分特征: 林龄 20 年, 林分密度 1 350 株/hm², 坡向 SE, 坡度 30°, 平均胸径 22.3 cm, 平均树高 17.5 m, 郁闭度 0.80, 林下植被盖度 40%。

2 研究方法

2.1 标准地的设置与生态系统生物量的测定 于 2019 年 5 月在 20 年生秃杉林中选择生长良好地块, 按照不同坡位(上坡、中坡和下坡)共设置 3 块 20 m×30 m(600 m²)标准样地。测定样地内林木的胸径、树高、冠幅和枝下高, 根据调查结果计算林分平均胸径和平均树高。

基金项目 广西重点研发计划项目(桂科 AB17292008); 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA17204087-11); 国家自然科学基金资助项目(31760201, 31560206)。

作者简介 刘凡胜(1965—), 男, 广西河池人, 工程师, 从事人工林培育技术研究。*通信作者, 研究员, 从事森林培育、森林土壤和森林生态研究。

收稿日期 2021-06-20; **修回日期** 2021-07-15

分别在每块样地选择 1 株平均木并伐倒^[14],采用 Monsic 分层切割法测定树叶、树枝、干皮、干材地上部分鲜质量,采用全根挖掘法测定根系即地下部分鲜质量。同时在各样地内按对角线分别设置 3 个 2 m × 2 m 小样方,对样方内灌木、草本的种类、个体数、高度和覆盖度等进行调查,然后采用样方收获法测定灌木层、草本层和凋落物层鲜质量^[11]。按乔木层各器官、灌木层-草本层和凋落物层样品各 500 g,于 80 °C 烘干至恒重,测定各样品的含水率和干质量,估算各组分生物量^[11]。

2.2 样品采集和碳含量测定 选取经测定生物量后的乔木层各器官、灌木层、草本层和凋落物层样品,重新放入烘箱中于 80 °C 烘干,经粉碎过 0.25 mm 筛后装入自封袋内密封保存。同时按对角线设置方法在每块样地内挖掘 3 个土壤剖面,按 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 共 4 个层次分别采集 1 kg 土壤,同一样地内相同土层样品混合后按四分法取 1 kg 装入布袋内^[14],室内自然风干后研磨过 0.149 mm 筛装入自封袋,与待测植物样品均采用 K₂CrO₇ 容量法测定有机碳含量^[15]。

2.3 数据统计与处理 利用 Excel 2013 软件进行相关数据处理,采用 SPSS 22.0 软件对秃杉人工林生态系统中乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和土壤层碳含量、碳储量及乔木层不同器官年碳固定量间差异性等进行单因素方差分析(ANOVA)。生态系统碳储量和乔木层年净固碳量等相关计算参照文献[11]。

3 结果与分析

3.1 生态系统碳含量

3.1.1 乔木层碳含量。秃杉乔木层各器官碳含量为 436.4~501.2 g/kg,全树平均碳含量为 482.4 g/kg,其大小表现为干皮(501.2 g/kg)>树枝(494.8 g/kg)>树根(491.9 g/kg)>干材(487.6 g/kg)>树叶(436.4 g/kg),其中干皮、树枝均与树叶间差异显著($P<0.05$)。

3.1.2 林下植被层和土壤层碳含量。秃杉林下植被不同层次碳含量表现为灌木层(449.8 g/kg)>凋落物层(424.7 g/kg)>草本层(392.5 g/kg),均远高于土壤层平均碳含量(19.0 g/kg)(表 1)。在土壤层碳含量的垂直分布中,受地表腐殖化作用形成有机物质聚集效应的影响,土壤有机碳含量呈现随土壤深度增加而显著下降的变化趋势($P<0.05$),其中 0~20 cm 土层有机碳含量(39.6 g/kg)是其他土层的 1.83~7.47 倍。

3.2 生态系统碳储量及其分配

3.2.1 植被层碳储量。该研究中,秃杉林生态系统的植被层包括乔木层、灌木层、草本层和凋落物层。由表 2 可知,植被层不同层次生物量及碳储量间大多呈显著差异($P<0.05$)。其中,乔木层碳储量占植被层碳储量的 95.53%。在乔木层组成的不同器官中,其碳储量从大到小依次为干材(61.91 t/hm²)、树枝(14.87 t/hm²)、树根(13.36 t/hm²)、树叶(5.02 t/hm²)、干皮(4.27 t/hm²),其所占乔木层碳储量比例分别为 62.27%、14.95%、13.44%、5.05%、4.29%,占植被层碳储量比例分别为 59.48%、14.28%、12.84%、4.83%、4.10%。生

物量及其所占比例由大到小排序与碳储量相一致。

表 1 林下植被和土壤碳含量

Table 1 Carbon content in underground vegetation and soil

序号 No.	层次 Layer	碳含量 Carbon content g/kg	
1	灌木层	449.8±15.6 a	
2	草本层	392.5±12.9 b	
3	凋落物层	424.7±21.4 a	
4	土层	0~20 cm	39.6±1.8 a
		20~40 cm	21.6±1.1 b
		40~60 cm	9.5±0.5 c
		60~80 cm	5.3±0.3 d
		平均	19.0±0.9

注:同列不同小写字母表示不同林下植被结构层次或不同土层间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different levels of underground vegetation structure or different soil layers($P<0.05$)

表 2 植被层生物量和碳储量

Table 2 Biomass and carbon storage in the vegetation layer

层次 Layer		生物量 Biomass t/hm ²	占比 Proportion%	碳储量 Carbon storage t/hm ²	占比 Proportion %
乔木层 Arbor layer	树叶	11.50 g	5.35	5.02 g	4.83
	树枝	30.06 f	13.97	14.87 f	14.28
	干皮	8.52 h	3.96	4.27 h	4.10
	干材	126.97 a	59.02	61.91 a	59.48
	树根	27.15 c	12.62	13.36 c	12.84
灌木层 Shrub layer		3.16 g	1.47	1.42 g	1.36
草本层 Herb layer		1.83 h	0.85	0.72 h	0.69
凋落物层 Litter layer		5.93 f	2.76	2.52 f	2.42
合计 Total		215.12	100	104.09	100

注:同列不同小写字母表示不同组分生物量和碳储量间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in biomass and carbon storage of different components($P<0.05$)

受树种生物学特性及其林分结构等影响,秃杉林郁闭度较大,林下植被发育较差,覆盖度相对较小,仅为 0.40%,因此林下植被组成中的灌木层、草本层生物量均较小,分别为 3.16 和 1.83 t/hm²,碳储量分别为 1.42、0.72 t/hm²,分别占植被层碳储量的 1.36%和 0.69%。而凋落物层相对较丰富,其生物量和碳储量分别为 5.93 和 2.52 t/hm²,其中碳储量占植被层碳储量的 2.42%(表 2)。

3.2.2 土壤层碳储量。由表 3 可知,秃杉林土壤层(0~80 cm)总碳储量为 151.72 t/hm²,各土层碳储量在土层垂直分布上表现出与碳含量相同的变化趋势,即土层越深,其碳储量越少,且各土层间差异显著($P<0.05$)。在各土层碳储量的分配中,0~20 cm 土层碳储量(70.52 t/hm²)所占比例(46.48%)接近 50%,远高于 20~40、40~60 和 60~80 cm 土层碳储量所占比例(分别为 27.82%、15.78%和 9.92%)。

表 3 土壤层碳储量

Table 3 Carbon storage of soil layer

土层 Layer/cm	碳储量 Carbon storage/t/hm ²	占比 Proportion/%
0~20	70.52 a	46.48
20~40	42.21 b	27.82
40~60	23.94 c	15.78
60~80	15.05 d	9.92
合计 Total	151.72	100

注:同列不同小写字母表示各土层间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among soil layers

3.2.3 生态系统碳储量及其分配。秃杉林生态系统总碳储量为 255.81 t/hm²,其中乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和土壤层碳储量分别为 99.43、1.42、0.72、2.52 和 151.72 t/hm²,且各层次碳储量间差异显著($P<0.05$);其所占生态系统总碳储量的比例依次为 38.87%、0.56%、0.28%、0.98%、59.31%(表 4)。

3.3 乔木层净固定碳量 据估算,20 年生秃杉林乔木层年净生产力为 12.52 t/(hm²·a),年净固碳量为 5.98 t/(hm²·a),

相当于年 CO₂ 吸收量 21.93 t/(hm²·a)。乔木层中树叶、树枝、干皮、干材和树根年净固碳量分别为 1.26、0.74、0.21、3.10 和 0.67 t/(hm²·a),其分配比例由大到小为干材(51.84%)、树叶(21.07%)、树枝(12.37%)、树根(11.21%)、干皮(3.51%)(表 5)。

表 4 生态系统碳储量及其分配

Table 4 Carbon storage and distribution of ecosystem

层次 Layer	碳储量 Carbon storage t/hm ²	占比 Proportion %
乔木层 Arbor layer	99.43 b	38.87
灌木层 Shrub layer	1.42 d	0.56
草本层 Herb layer	0.72 e	0.28
凋落物层 Litter layer	2.52 c	0.98
土壤层 Soil layer	151.72 a	59.31
合计 Total	255.81	100

注:同列不同小写字母表示各层次间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among levels ($P<0.05$)

表 5 乔木层各器官年净固定碳量

Table 5 Annual net carbon sequestration of the arbor layer

部位 Position	年净生产力 Annual net productivity t/(hm ² ·a)	占比 Proportion/%	年净固碳量 Annual carbon sequestration t/(hm ² ·a)	占比 Proportion/%	年 CO ₂ 吸收量 Annual net CO ₂ absorption t/(hm ² ·a)	占比 Proportion/%
树叶 Leaf	2.88 b	23.00	1.26 b	21.07	4.62 b	21.07
树枝 Branch	1.50 c	11.98	0.74 c	12.37	2.71 c	12.37
干皮 Bark	0.43 f	3.43	0.21 f	3.51	0.77 f	3.51
干材 Stem	6.35 a	50.72	3.10 a	51.84	11.37 a	51.84
树根 Root	1.36 d	10.87	0.67 d	11.21	2.46 d	11.21
合计 Total	12.52	100	5.98	100	21.93	100

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments($P<0.05$)

4 结论与讨论

桂西北 20 年生秃杉平均碳含量为 482.4 g/kg,介于目前国内外学者进行森林碳储量计算时所采用的转换系数 450~500 g/kg^[16],不同器官碳含量表现为干皮>树枝>树根>干材>树叶,与相同区域 12 年生西南桦(干材>树枝>树根>树叶>干皮)^[17]、12 年生光皮桦(干材>干皮>树根>树枝>树叶)^[18]、26 年生马尾松(树叶>干材>干皮>树根>树枝)^[19]存在差异,表明不同树种各器官的碳积累存在一定程度的差异性。秃杉林群落不同结构层次植物体内碳含量表现为随着光照强度的下降而降低的变化趋势,即乔木层>灌木层>草本层,这与相同区域黄弼昌等^[17]对西南桦和韦明宝等^[19]对马尾松林的研究结果相一致。

秃杉林生态系统总碳储量为 255.81 t/hm²,其中乔木层、灌木层、草本层、凋落物层和土壤层碳储量分别为 99.43、1.42、0.72、2.52 和 151.72 t/hm²,且各层次碳储量间差异显著($P<0.05$),其所占生态系统总碳储量的比例分别为 38.87%、0.56%、0.28%、0.98%、59.31%。可见,虽然该秃杉林林龄已达到 20 年,但其植被层碳储量尚未达到土壤层的储量水平,土壤层碳储量仍在生态系统碳储量中居于主导地位。据报道,我国森林乔木层碳储量平均为 57.07 t/hm²^[20],我国热带、亚

热带针叶林碳储量为 63.17 t/hm²^[20],相同气候带的广西北部 23 年生杉木林^[21]和福建省顺昌县 20 年生马尾松林^[22]乔木层碳储量分别为 85.88 t/hm²和 50.28 t/hm²,说明该研究秃杉林乔木层碳储量较高。此外,该研究中秃杉林土壤层有机碳储量为 151.72 t/hm²,高于我国人工林土壤平均碳储量(107.10 t/hm²)^[23]。这也是研究区杉木林具有较高生物量和碳储量积累能力的重要原因,同时也说明该秃杉林不但可以通过其乔木层生物量提高生态系统碳积累能力,同时也促进了土壤有机碳的生物积累。

20 年生秃杉林乔木层年净固定碳量为 5.98 t/(hm²·a),年 CO₂ 吸收量为 21.93 t/(hm²·a),高于相同气候带的广西北部 16、23 年生杉木林[3.89、3.73 t/(hm²·a)]^[21]和广西武宣县 23 年生马尾松人工林[3.09 t/(hm²·a)]^[24],也高于相同区域采用较高密度经营的 28 年生秃杉林[5.17 t/(hm²·a)]^[11]。可见,在目前的经营条件下,秃杉林的碳积累速率较快。由于秃杉林成熟期和衰退期均较晚,速生期持续时间长。因此,该研究区秃杉林还具有较强的碳汇潜力,合理经营和发展秃杉人工林将是一种兼具木材收获和碳汇双重效益或功能的重要经营模式。

(下转第 105 页)

壤土。

新县油茶林土壤整体呈酸性,各地区油茶林土壤肥力存在差异,部分地区存在 P、B 养分的缺失。土壤有效 N、有效 Ca、有效 Mg、有效 Cu、有效 Zn、全 K 含量变化幅度大,其中有效 P、有效 Mg 在空间上表现为强变异。对新县油茶林土壤养分评价结果表明,土壤有效 N、有效 P、有效 Mg 含量低等级占比高,分别为 92.59%、83.33%、74.07%,有效 Fe、有效 Mn 高等级占比高,分别为 100%、88.89%。

油茶林地土壤物理性质与化学性质存在显著、极显著正负相关,其中容重与有机质的相关系数为-0.524,黏粒与有效 Fe 的相关系数为 0.510。容重影响土壤的通透性,从而影响土壤水分和养分的循环^[14],土壤有机质含量与土壤容重有一定的关联性^[15],表明土壤容重越小,有机质含量越丰富。同时土壤黏粒含量与有效 Fe 含量呈正相关性,新县油茶林土壤有效 Fe 含量丰富,表明油茶林中黏粒含量较为丰富,有利于有效 Fe 养分的保存。

由于不同气候条件(如光照、温度)以及人为管理等因素都会造成油茶林地土壤理化性质的差异,新县油茶林应有针对性地进行林地管理。对于 P、B 养分缺失的油茶林地应注意养分的施加,土壤有效 P、有效 Mg 在空间上表现为强变异性,这与张希鸥^[16]研究结果一致,P、Mg 养分的施加应注重空间位置性。河南新县是我国油茶分布区的北缘地区,该研究表明新县油茶林土壤 N、P、Mg 含量缺乏,Fe、Mn 含量丰富,这与胡冬南等^[17]对南方江西油茶林地的研究结果基本一致,可见南北方油茶林土壤养分丰缺状况具有相似性。因此,在油茶林地管理中应及时补充 N、P、Mg 肥,控制或减少

Fe、Mn 肥的施加,保证油茶正常生长发育,营造良好的土壤环境。

参考文献

- [1] 庄瑞林.中国油茶[M].2版.北京:中国林业出版社,2008.
- [2] 石伟勇.农副产品综合利用化学[M].杭州:浙江大学出版社,2000:116-131.
- [3] 郑存德.土壤物理性质对玉米生长影响及高产农田土壤物理特征研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2012.
- [4] 谭学进.黄土高原草地恢复对土壤物理性质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [5] 丁晓纲,张应中,张祥宇,等.广东省油茶林地土壤养分分析[J].中国农学通报,2013,29(22):15-19.
- [6] 王玉娟,何小三,龚春,等.油茶成林地土壤养分含量变化规律[J].经济林研究,2010,28(2):55-58.
- [7] 杨文利,朱平宗,闫靖坤.水平阶种植油茶对红壤坡地土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):315-320.
- [8] 凡国华,刘超,李洋,等.不同林龄油茶林土壤理化性质的变化[J].东北林业大学学报,2019,47(4):38-42.
- [9] 黄春梅.紫色土区不同林龄油茶人工林土壤理化性质差异分析[J].安徽农业科学,2017,45(13):157-159.
- [10] 裴向阳,钟凤娣,张兵,等.广东省三种典型经济林地土壤性状和养分储量研究[J].经济林研究,2014,32(3):42-47.
- [11] 王大顶.油茶林地土壤砂砾含量对茶果经济性状的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2019.
- [12] 宗巧鱼,艾宁,杨丰茂,等.陕北黄土区枣林土壤物理性质变化研究[J].中国农学通报,2020,36(6):48-56.
- [13] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 袁颖丹,李志,张文元,等.武功山山地草甸不同海拔土壤氮素分布及其与土壤物理性质的关系[J].中南林业科技大学学报,2016,36(10):108-113.
- [15] 马麟英,梁月兰,韦国钧,等.东兰县林地土壤有机质含量与土壤容重的相关性分析[J].湖北农业科学,2014,53(1):59-62.
- [16] 张希鸥.基于 GIS 和地统计学的油茶林土壤养分空间变异研究:以江西永丰为例[D].南昌:江西农业大学,2011.
- [17] 胡冬南,刘亮英,张文元,等.江西油茶林地土壤养分限制因子分析[J].经济林研究,2013,31(1):1-6.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 黄振格,何斌,谢敏洋,等.连栽桉树人工林土壤氮素季节动态特征[J].东北林业大学学报,2020,48(9):88-94.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 黄弢昌,何斌,周燕萍,等.速生阶段西南桉人工林碳储量及其分布格局[J].中南林业科技大学学报,2016,36(2):79-83.
- [24] 滕秋梅,刘俊,廖倩苑,等.桂西北光皮桦人工林生态系统碳储量及其分布格局[J].西部林业科学,2016,45(4):119-122,129.
- [25] 韦明宝,王朝健,杨正文,等.桂西北马尾松人工林生态系统碳储量与分布[J].亚热带农业研究,2019,15(3):152-156.
- [26] 周玉荣,于振良,赵士洞.我国主要森林生态系统碳储量与碳平衡[J].植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [27] 兰斯安,杜虎,曾霞平,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.
- [28] 尉海东,马祥庆.不同发育阶段马尾松人工林生态系统碳储量研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(1):171-174.
- [29] 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(9):5437-5448.
- [30] 方晰,田大伦,晋灿辉.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.

(上接第 100 页)

参考文献

- [1] 左弟召,陈克龙,刘娟.青海湖流域河源湿地生态系统碳交换对模拟增温的响应[J].安徽农业科学,2020,48(23):1-5.
- [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] CHEN D M,ZHANG C L,WU J P,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.
- [4] ZHAO M M,YANG J L,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] 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.
- [7] 陈强,袁明,刘云彩,等.秃杉的物种确立、天然林种群特征、保护、引种和种源选择研究[J].西部林业科学,2012,41(2):1-16.
- [8] 韦家国,刘凡胜,杨正文,等.秃杉林和连栽杉木林生物生产力及其分配特征[J].广西林业科学,2018,47(1):68-71.
- [9] 何斌,黄恒川,黄承标,等.秃杉人工林营养元素含量、积累与分配特征的研究[J].自然资源学报,2008,23(5):903-910.
- [10] 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.
- [11] 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